



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

## **GRADO EN FUNDAMENTOS DE ARQUITECTURA**

### **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**CURSO 2014/2015**

#### **TÍTULO:**

Uniones en estructuras de madera laminada. Pórticos de luces medias.

#### **AUTORA:**

Rocío Martos Arroyo

#### **TUTOR:**

José Sánchez Sánchez

**Fecha:** 02/07/2015

1. Justificación y acotación del ámbito	02
2. Objetivos y metodología	03
3. Estado del arte	
3.1. Clasificación de uniones en madera	04
3.2. Consideraciones constructivas en las uniones	08
3.3. Normativa de aplicación	10
4. Estudio de casos	
4.1. Base de datos: proyectos en madera laminada	12
4.2. Análisis base de datos: Soluciones más utilizadas	24
5. Análisis estructural de uniones mecánicas	
5.1. Hipótesis para el cálculo	25
5.2. Análisis de nudos articulados	30
5.3. Análisis de nudos rígidos	32
6. Resultados globales del análisis y conclusiones	34
7. Posibles vías de investigación posteriores	35

ANEXOS:

A1. Bibliografía utilizada	36
A2. Fuentes de imágenes utilizadas	37
A3. Normativa de referencia (solo en CD)	
A4. Diagramas de SAP para apartados 5.2. y 5.3. (solo en CD)	

La madera es un material que, estructuralmente, puede ofrecer muy buenos resultados, equiparables bajo determinadas circunstancias a los de otros más extendidos actualmente como el acero y el hormigón. Hoy en día, con el desarrollo de la madera laminada encolada y la microlaminada, se pueden construir estructuras de luces y geometrías muy diversas de forma relativamente sencilla, como ocurre con los elementos curvos.

Además de ello, existe un factor muy positivo en su elección como material estructural, y es su baja densidad. Su ligereza, en proporción a su resistencia, la convierten en un material que compite con soluciones metálicas en cubriciones ligeras, en las que el peso propio de la estructura puede convertirse en un factor más determinante que el resto de las acciones.

Esto se muestra en la siguiente tabla, en la que se realiza una comparación entre las resistencias de los materiales estructurales más convencionales junto con la madera laminada de menor resistencia, para obtener una relación entre las densidades necesarias de cada material y la resistencia a compresión que ofrecen. Como vemos, con la madera se obtiene prácticamente la misma resistencia a compresión que con el hormigón en masa elegido (HM25) con 5 veces menor peso (en la dirección paralela a la fibra).

Ya que su gran desventaja frente al acero es que su resistencia es 10 veces menor, a pesar de ser mucho más ligera, cuando las cargas son muy grandes se puede llegar a necesitar escuadrías tan grandes que deje de ser rentable su uso. Por ello, se deben tener en cuenta todas las variables con las que cuenta el proyecto antes de decidirse entre un material estructural u otro.

MATERIAL	COMPRESIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	TRACCIÓN (N/mm <sup>2</sup> )	MÓDULO E (N/mm <sup>2</sup> )	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD/ R <sub>COMPR</sub>
<b>MADERA GL24 h</b>	24	16.5	11.6·10 <sup>3</sup>	380	<b>15.8</b>
<b>HORMIGÓN HM25</b>	25	2.5	27.2·10 <sup>3</sup>	2300	<b>92</b>
<b>ACERO S235</b>	235	360	21·10 <sup>4</sup>	7850	<b>33.4</b>

T. 01. Relación resistencias y densidades de distintos materiales estructurales (para la madera, resistencias consideradas únicamente en el sentido paralelo a la fibra).

## 1. JUSTIFICACIÓN Y ACOTACIÓN DEL ÁMBITO

Además de ello, la madera cuenta con ciertas propiedades delicadas que hay que tener muy en cuenta a la hora su uso y diseño estructural. Ejemplo de esto es el hecho de que se trata de un material ortótropo, es decir, sus características mecánicas son distintas en sus tres dimensiones perpendiculares. Como se verá más adelante, este hecho es determinante en el comportamiento estructural de la madera y reduce las posibles soluciones frente a otros materiales cuya resistencia mecánica y rigidez son iguales en las tres dimensiones.

Esto es especialmente importante en las uniones entre elementos, punto siempre crucial para la apropiada resolución de una estructura, y aún más en este caso, en las que se pueden generar esfuerzos perpendiculares a la fibra. Esto es aplicable tanto a la madera aserrada como a la laminada, a pesar de que pueden existir ciertas diferencias mecánicas entre ellas, de las que también se hablará más adelante.

Por tanto, mediante esta investigación se pretende profundizar en el diseño de las uniones en estructuras de madera, por ser los puntos más críticos en ellas. Sin embargo, debido a la extensión limitada de la investigación, el ámbito de estudio se ciñe a las uniones estructurales en madera laminada encolada (MLE), por ser la que ofrece más posibilidades en la construcción contemporánea. A pesar de ello, muchas reflexiones y soluciones son extrapolables también a la madera aserrada, generalmente si se refieren a escuadrías pequeñas (sobre todo en correas).

El objetivo fundamental de este estudio es analizar las diferentes soluciones de nudos utilizados en estructuras de MLE, concibiéndolos de forma integral, es decir: analizando cómo se comportan tanto la madera como los elementos metálicos (tornillos, conectores, placas...) en las diferentes situaciones, y comprobando si cumplen todas las comprobaciones adecuadas para soportar las cargas existentes y también para asegurar la durabilidad necesaria.

Dichas exigencias no siempre son tan fáciles de resolver, ya que pueden aparecer muchas incompatibilidades en ellas por las múltiples diferencias entre ambos materiales: sus resistencias a los distintos esfuerzos, sus módulos de elasticidad, sus reacciones a la humedad, a los cambios de temperatura... Por tanto, se pretende hacer un análisis integral en el que todas esas cuestiones se tengan en cuenta para encontrar las uniones que pueden proporcionar mejores funcionamientos.

Finalmente, teniendo en cuenta todas estas circunstancias, se realiza una clasificación, a modo de resumen del análisis que se ha llevado a cabo, en la que se representan las uniones más óptimas en los diferentes puntos de una estructura de madera laminada, diferenciándolas según su adecuación a unas solicitaciones determinadas (esfuerzos del elemento, cargas globales, dimensiones y luces, etc.).

## 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

En cuanto a la metodología seguida, inicialmente se parte de una clasificación en la que se visualizan, en general, los tipos de uniones existentes en madera (apartado 5.a), de las cuales se prestará especial atención después a las uniones mecánicas, que son las realmente utilizadas en la actualidad. También se revisa el ámbito normativo, especificando las normas aplicables en esta situación en un listado detallado (apartado 5.b).

Posteriormente, a partir de una serie de casos reales (apartado 6) recopilados en fichas, se analizarán las soluciones más recurrentes en edificios contemporáneos con estructuras de MLE. Por último, se procede al análisis pormenorizado (apartado 7) de una serie de nudos seleccionados, en unas condiciones establecidas previamente (por geometría, tipo y cuantificación de cargas, tipo de restricción en el nudo buscada y comprobaciones de dicho nudo), para llegar a una clasificación de uniones con mejor funcionamiento según las características buscadas (apartado 8).

Asimismo se adjuntan una serie de anexos que pueden ser de utilidad para futuras investigaciones y aplicaciones de madera en estructuras, como empresas relacionadas con el sector, catálogos de soluciones constructivas y otros documentos de interés.



Antes de comenzar con el desarrollo del trabajo, se considera importante entender el marco en el que se engloba, para poder entender por qué se ha llegado a la elección de algo tan específico dentro de un ámbito tan amplio como son las estructuras de madera.

Para ello, primero se introduce una clasificación general de las uniones en este tipo de estructuras, así como sus posibilidades de uso de forma breve, ya que dichas uniones volverán a aparecer en la parte práctica del estudio. Tras esto, se presentan las principales consideraciones constructivas y estructurales a tener en cuenta en cualquier unión en la que intervenga algún elemento de madera, con sus respectivas justificaciones.

Posteriormente se comenta el marco normativo en el que nos situamos a la hora de proyectar y edificar dichas estructuras desde los ámbitos nacional e internacional, tanto de obligado cumplimiento como las recomendables, concluyendo así el análisis del estado del arte sobre el tema tratado.

### 3.1. CLASIFICACIÓN DE UNIONES EN MADERA

A la hora de establecer una clasificación de uniones estructurales, son varios los criterios que se pueden seguir: por elementos unidos, por esfuerzos en la unión, por la forma del encuentro, por el medio de unión empleado... Esta última es la que se añade a continuación, por ser la más extendida en la bibliografía sobre madera estructural y a la vez la más coherente con su uso.

Así, las uniones en estructuras de madera pueden clasificarse en: carpinteras o tradicionales, encoladas y mecánicas.

#### a) Uniones carpinteras o tradicionales:

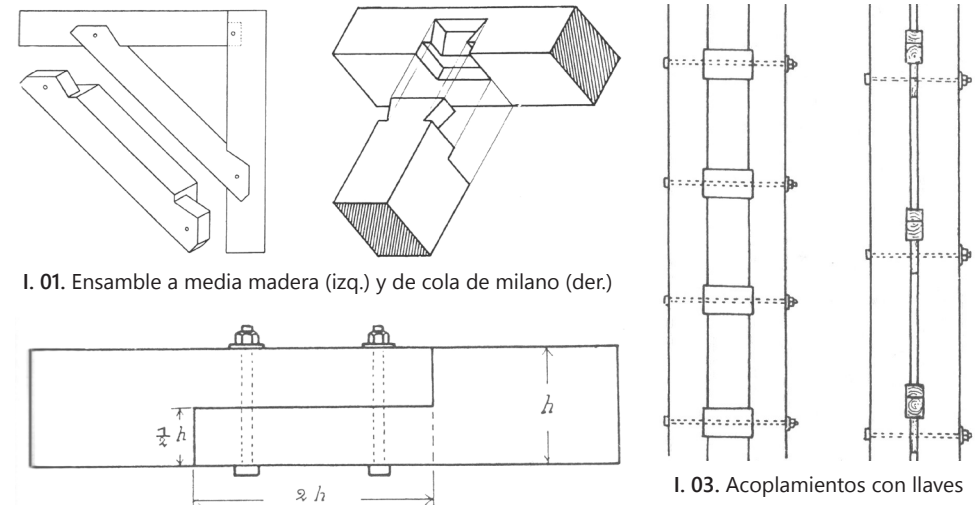
En ellas, los elementos se unen por medio de un trabajo de carpintería, aunque normalmente también suelen contar con algún elemento puntual, como pasadores, para evitar el deslizamiento entre piezas. Sin embargo, dichos elementos son relativamente débiles, en comparación con la estructura, y no aportan mayor resistencia a la unión, sino que solo se usan para evitar que se desarme. En función de la forma de encuentro, se clasifican en:

## 3. ESTADO DEL ARTE

### 3.1. CLASIFICACIÓN DE UNIONES EN MADERA

**-Ensamble:** cuando las piezas se cortan formando un determinado ángulo, pudiendo ser perpendiculares (encuentro entre pilar y viga), u oblicuas (como en la unión entre el pendolón y los tornapuntas de una cercha). Debido al posible deslizamiento entre los elementos, normalmente no se apoyan directamente uno sobre otro, sino que se realizan rebajes (cuyas dimensiones deben estudiarse con cuidado para evitar la rotura del elemento por cortante), o cajas y espigas, es decir, entalladuras en uno de ellos dentro de las que se encaja el extremo del otro, con menor sección. Cuando los elementos están en el mismo plano y se apoyan uno sobre otro, suelen unirse a media madera, lo que significa que se realiza el mismo rebaje en ambas piezas, pero de forma opuesta, para que encajen entre sí, reduciendo la sección de cada uno de ellos a la mitad en la unión.

**-Empalme:** cuando los elementos se unen en sus testas, generando continuidad entre elementos estructurales. Son usados, por ejemplo, para constituir una viga de cierta longitud, a partir de varias piezas más cortas. Pueden realizarse mediante cortes horizontales y verticales, formando rebajes en ambas piezas que encajan entre sí (como es el caso del empalme de llave), o realizando un corte oblicuo, pudiendo asimismo realizar una unión oblicua con rebajes en los dos elementos (como en el empalme en rayo de Júpiter).



I. 02. Empalme a media madera con pernos

I. 03. Acoplamiento con llaves

**-Acoplamiento:** si se unen en sus caras, en sentido longitudinal, para constituir una pieza de mayor canto o ancho. Requiere de un elemento mecánico para afianzar la unión, usándose tradicionalmente bridas metálicas, formadas por un pequeño herraje doblado en sus extremos (empotrándolos en la madera) y tornillos roscados. Además, se le realiza un dentado a ambas piezas de madera por las caras de contacto, o bien se emplean llaves <sup>(1)</sup>.

En las uniones carpinteras, los esfuerzos se transmiten a través del contacto entre piezas, ya sea directamente mediante elementos apoyados unos sobre otros para la transmisión de compresiones, o incluyendo tensiones tangenciales, si existen cajas y espigas o rebajes (cuya función es evitar el desplazamiento de las piezas). También existen uniones que resisten tracciones, que se usan, por ejemplo, en los tirantes de una cercha (como el ensamble de cola de milano).

Algo a tener en cuenta en este tipo de uniones es que su diseño se centra exclusivamente en soportar las cargas habituales: gravitatorias y de viento. Sin embargo, muchas de ellas no tienen estabilidad ante cargas laterales o en casos de inversión de esfuerzos. Ejemplo de esto son la mayoría de los empalmes entre vigas, diseñados para trabajar a flexión, pero que permiten el deslizamiento entre sus elementos ante una carga; incluso aunque normalmente están fijados con clavos o pasadores, éstos no suelen tener resistencia suficiente ante esfuerzos relativamente importantes.

El uso de las uniones carpinteras, muy extendido en el pasado, se encuentra hoy en día reducido a casos muy concretos: sobre todo, se emplea en obras de rehabilitación específicas de estructuras vistas de madera de luces reducidas, en las que el aspecto es muy importante. A pesar de su buen funcionamiento ante incendio (mejor que con herrajes o clavijas metálicas vistas) y de que existen técnicas en la actualidad que permitirían realizar estos trabajos de forma muy económica, gracias a la fabricación mediante control numérico <sup>(2)</sup> y a la escasez de piezas metálicas, no son viables en estructuras de luces medias o grandes (el ámbito en el que más se usa la madera laminada actualmente), debido a que habría que sobredimensionar mucho las piezas para realizar los rebajes o entalladuras.

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1. CLASIFICACIÓN DE UNIONES EN MADERA

Debido a esto, no se profundizará más en este tipo de uniones a lo largo del trabajo, por no entrar en el ámbito establecido previamente. Por tanto, no se contemplarán en el análisis ni en el cálculo posterior.

##### b) Uniones encoladas:

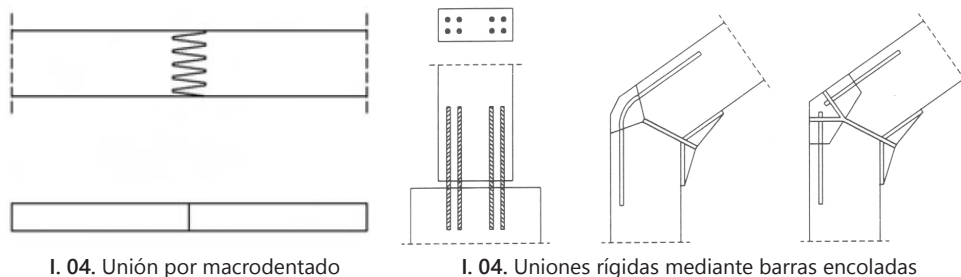
Este tipo de uniones también tienen un aspecto final bastante limpio, al igual que las carpinteras. Sin embargo, su funcionamiento es muy diferente: se trata de conseguir un enlace muy rígido en el que se transmiten los esfuerzos y momentos flectores por completo, por lo que puede utilizarse para ejecutar pórticos de madera laminada, llevando a obra los elementos por separado (viga y pilares, o incluso por partes si son de grandes dimensiones) y uniéndolos posteriormente, obteniendo finalmente, en apariencia, un único elemento continuo.

Dichas uniones pueden llevarse a cabo utilizando únicamente madera y un adhesivo, realizando un macrodentado en las piezas similar al que se emplea en los empalmes de madera laminada. También existe otra posibilidad, la unión mediante barras encoladas, realizada por medio de barras macizas metálicas que se empotran en ambas piezas de madera, en unos taladros de mayor diámetro que las mismas, que se rellenan con el adhesivo empleado. Si las barras se colocan en la dirección de las fibras de la madera, y hay un número suficiente de las mismas, estas sólo sirven para generar un nudo suficientemente rígido entre piezas o un empotramiento (por ejemplo, en base de pilar). Sin embargo, si se colocan en perpendicular a la fibra, pueden funcionar también como refuerzo, supliendo la baja resistencia a tracción y compresión de la madera en esta dirección.

A pesar de que esta solución no está muy extendida en España, sí que ha sido muy utilizada en otros como Alemania, Rusia o los países Escandinavos durante años. Ya que existe algún caso de su utilización en los ejemplos presentados posteriormente, se procederá a un mayor análisis en el estudio.

<sup>(1)</sup> Llave: en carpintería, cuña de madera que se encaja entre dos piezas para asegurar su unión, colocándolas de dos en dos.

<sup>(2)</sup> FUENTE: Argüelles, R. / Arriaga, F. Estructuras de madera: Diseño y cálculo. 1996. AITIM



### c) Uniones mecánicas:

Son todas aquellas uniones en las que se emplean elementos metálicos para la transmisión de esfuerzos entre partes de la estructura. Actualmente son la solución más empleada, por su relativa facilidad de ejecución en obra, la gran oferta existente en el mercado y su versatilidad. La gran parte de casas comerciales dedicadas a la edificación en madera cuenta con amplios y detallados catálogos especializados en este tipo de enlace.

Dentro de las uniones mecánicas podemos distinguir tres tipos, en función de los elementos empleados para llevarlas a cabo y el funcionamiento de los mismos:

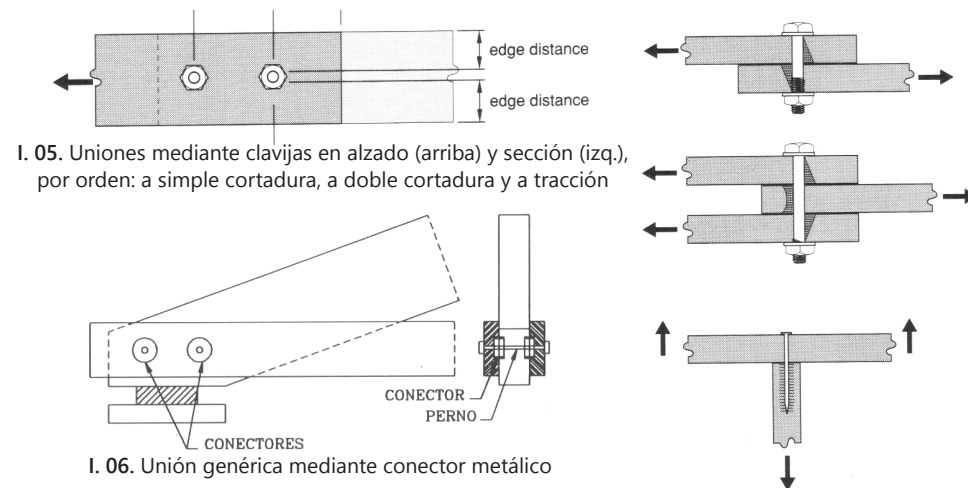
#### -Mediante clavijas:

Así se denomina a las piezas metálicas de forma cilíndrica o ligeramente cónica y alargada que atraviesan los elementos de madera. Dentro de esta clasificación se incluyen clavos, grapas, pernos, tirafondos y pasadores. Cada uno de ellos tiene una geometría específica, admite dimensiones determinadas y cuenta con una capacidad resistente distinta (se usa distinto acero para cada una).

Por tanto, en función de la escala y las cargas de la estructura, se empleará un tipo u otro. En cuanto a su funcionamiento, la carga se transmite de un elemento a otro mediante el aplastamiento de la madera, que transmite esfuerzos de flexión o cortante a la clavija y esta los dirige asimismo a la otra pieza de madera. Es fundamental en este tipo de uniones el control del número de clavijas, intentando distribuir al máximo la carga en la unión, para evitar esfuerzos demasiado grandes que superen la resistencia al aplastamiento de la madera.

## 3. ESTADO DEL ARTE

### 3.1. CLASIFICACIÓN DE UNIONES EN MADERA



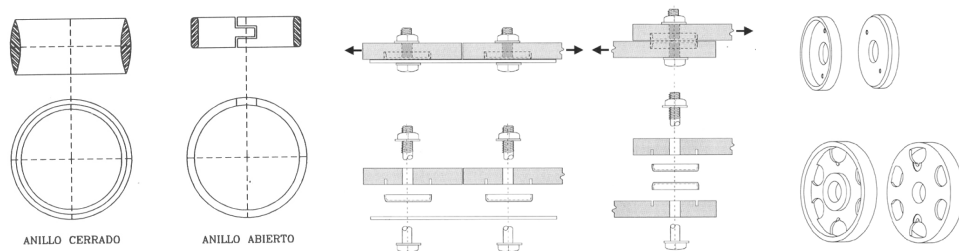
#### -Mediante conectores:

Son elementos de geometría bastante distinta a la de las clavijas. En lugar de ser el largo su dimensión principal, es el diámetro y el ancho de la pieza lo que los caracteriza, ya que su función es la de proporcionar una mayor superficie de contacto con la madera, y así poder transmitir una mayor tensión sin provocar el agotamiento de la misma por aplastamiento.

Los conectores pueden ser metálicos (de anillo, de placa o dentados) o de madera (similares a los de placa), y sirven para unir entre madera y acero o dos piezas de madera, quedando ocultos entre ellas. Por tanto, cuentan con un orificio central, para poder fijarlos en su posición por medio de una clavija (normalmente pernos). Dichas clavijas no deben considerarse como parte resistente de la unión, debido a que no tienen suficiente contacto con la madera para transmitir los esfuerzos (suelen insertarse en taladros realizados previamente y de diámetros sobredimensionados <sup>(3)</sup>).

Así, los conectores suelen utilizarse en uniones de mayores escuadrías, en las que pretende reducirse el número de clavijas o bien en las que las cargas son tan grandes que no puede solucionarse de ese modo. Sin embargo, en su diseño debe tenerse en cuenta que se reduce la efectividad de los mismos cuando se colocan varios alineados en la dirección de la carga (este aspecto y el resto del cálculo se desarrollará en el apartado de análisis).

<sup>(3)</sup> FUENTE: Argüelles, R. / Arriaga, F. Estructuras de madera: Diseño y cálculo. 1996. AITIM



I. 07. Conectores de anillo

I. 08. Conectores de placa para unir entre madera o madera-acero

-Mediante herrajes:

Esta última solución es prácticamente la más extendida en estructuras de luces tanto medias como grandes en la actualidad, gracias a la gran oferta de herrajes disponibles en el mercado y su facilidad de resolución. Dentro de este tipo encontramos los herrajes de menor espesor (hasta 2-3 mm como máximo, por lo general) y estandarizados, cuyas geometrías varían según el fabricante y las dimensiones de las piezas a las que vayan fijarse, que incluso disponen de los orificios necesarios para su fijación mediante clavijas, con las distancias fijadas según cálculo y/o Eurocódigo 5.

Este tipo suele emplearse fundamentalmente en las uniones entre correas y vigas, por la gran facilidad de estandarización que existe en dichos enlaces (a partir de las cargas, la luz y la distancia entre correas), aunque también existen herrajes estandarizados para uniones entre viga y soporte, entre elementos de una cercha (denominados placa-clavo por el dentado con el que cuentan) o entre soporte y cimentación, pero por lo general cuando sus cargas y sus escuadrías son pequeñas.

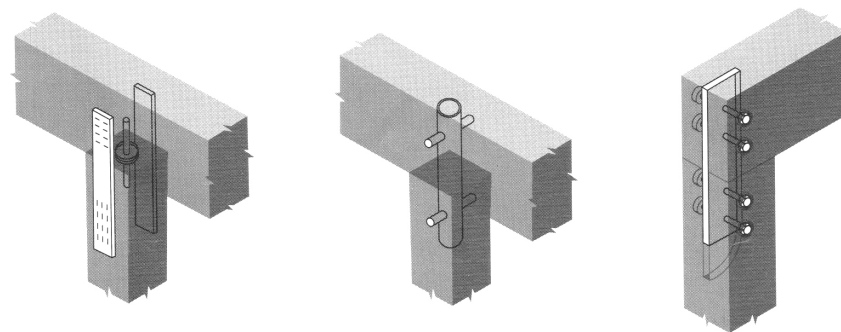
Otro tipo, generalmente usado en estructuras de madera laminada de grandes luces, está formado por placas metálicas de mayor espesor (a partir de 4 mm, según esfuerzos soportados), que pueden situarse empotradas en el extremo del elemento de madera (ocultas) o envolviendo el extremo de la pieza total o parcialmente (en caja o en U), fijadas con clavijas.

En ambos casos, el funcionamiento estructural es la transmisión de esfuerzos por contacto entre la madera y el herraje, por lo que las clavijas no aportan mayor resistencia (a no ser que estén pretensados, lo cual sólo es posible si el herraje se sitúa visto hacia el exterior). Debido a la gran resistencia del acero, incluso empleando espesores muy pequeños en relación con los de la madera, resisten satisfactoriamente los esfuerzos soportados (el espesor de la placa se fija en función de este aspecto).

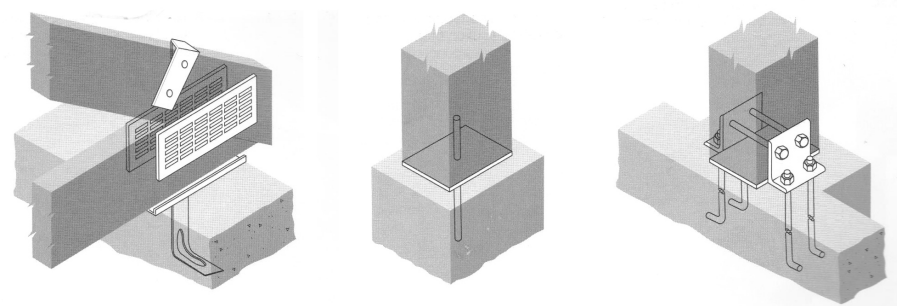
### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1. CLASIFICACIÓN DE UNIONES EN MADERA

Cuando las piezas de madera son de escuadrías muy grandes y quiere conseguirse un nudo muy rígido, es probable que una única placa metálica empotrada no consiga los resultados esperados, por lo que en esas ocasiones suelen emplearse varias placas ocultas, empotradas en el extremo de la madera y soldadas a una placa perpendicular a ellas, que sirve como protección de la testa de la madera y como pieza que recoge los esfuerzos de todos los herrajes ocultos y los transmite al soporte o cimentación.



I. 09. Uniones viga-pilar con herraje visto (izq.), tubo hueco y pasadores (centro) y herraje oculto (der.)



I. 10. Unión para cercha con placa-clavo y para apoyo de pilar con herraje visto u oculto.

Habiendo realizado esta clasificación, ya quedan claros ciertos criterios de elección entre una solución u otra en función de cargas y dimensiones. Sin embargo, en el apartado de análisis del estudio pretende profundizarse mucho más en las diferencias entre estos distintos métodos de unión, para llegar a encontrar más criterios en este aspecto, incorporando asimismo consideraciones constructivas esenciales en este tipo de estructuras, que se exponen a continuación.



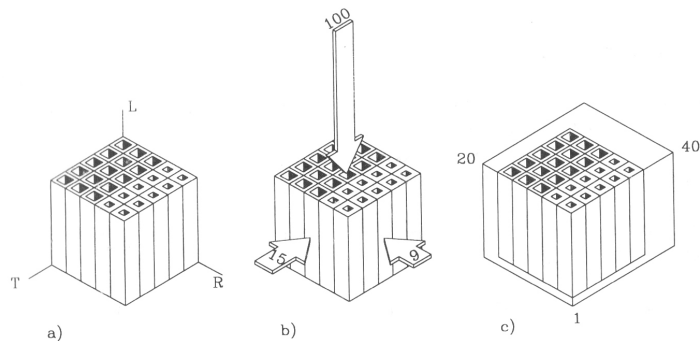
a) Ortotropía:

Como ya se ha mencionado previamente, la madera es un material anisótropo, ya que sus propiedades físicas y características mecánicas dependen de la dirección del esfuerzo. Concretamente, se considera que es ortótropo, ya que sus características son distintas en tres direcciones principales, ortogonales entre sí, que son:

- Axial: en la dirección de las fibras, es decir, paralela al eje de crecimiento del árbol.
- Radial: normal a la axial, contenida en cualquiera de las secciones transversales del tronco.
- Tangencial: perpendicular a las otras dos.

Esto se debe a la propia anatomía de madera, que puede asimilarse a un conjunto de tubos huecos de mucha longitud, pegados entre sí en sus paredes. Dichos tubos tienen distintos espesores según los anillos de crecimiento, lo cual explica la diferencia entre las direcciones radial y tangencial.

Sin embargo, ya que esta diferencia es muchísimo más pequeña que la existente entre las direcciones longitudinal y transversal, se suele simplificar la toma de datos a dos direcciones: paralela a la fibra (axial) y perpendicular a la fibra (transversal, englobando radial y tangencial) (4).



I. 11. Ortotropía de la madera e influencia en su resistencia y deformación

Si hablamos de madera laminada encolada, esta simplificación entre características paralelas o perpendiculares a la fibra tiene aún más sentido: este material se forma a partir de láminas obtenidas del tronco, conservando como dirección longitudinal la paralela a la fibra y adaptando la dirección transversal de las láminas de forma que se aproveche el máximo de madera de la sección del tronco. Por tanto, en una sección de madera laminada no existe esa diferenciación clara entre dirección radial y tangencial.

3. ESTADO DEL ARTE  
3.2. CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS EN LAS UNIONES

Por tanto, la madera es un material cuyo funcionamiento y resistencia óptimos se desarrollan en el sentido paralelo a la fibra. Esto se traduce en que las resistencias a tracción y compresión en perpendicular a la fibra son prácticamente mínimas. Esto es un aspecto fundamental en el diseño de uniones, ya que si su geometría induce a la madera tensiones perpendiculares a su fibra, se agrietará con mucha facilidad.

Propiedades		Clase Resistente			
		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Resistencia (característica), en N/mm²					
- Flexión	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
- Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
- Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
- Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
- Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
- Cortante	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Rígidez, en kN/mm²					
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,medio}$	11,6	12,6	13,7	14,7
- Módulo de elasticidad paralelo 5º-percentil	$E_{0,g,k}$	9,4	10,2	11,1	11,9
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,g,medio}$	0,39	0,42	0,46	0,49
- Módulo transversal medio	$G_{g,medio}$	0,72	0,78	0,85	0,91
Densidad, en kg/m³					
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

T. 02. Características mecánicas consideradas para distintas clases resistentes de madera laminada encolada homogénea (5).

b) Humedad en la madera:

Otro aspecto determinante en la madera es el agua, que aparece en ella tanto en su constitución (y que no puede eliminarse, ya que se destruiría la propia madera), como por impregnación (dentro de las paredes celulares, reduciendo su resistencia si su grado es demasiado alto) o dentro de los huecos de las fibras, denominada agua libre (lo que no afecta en sus características pero sí en su densidad).

Debido a esto, el grado de humedad debe ser considerado desde la elección del material y el diseño de la estructura, cuidando el empleo de madera en espacios cuyo contenido de humedad es importante. Ecuanto a las uniones, principalmente debe evitarse la acumulación o condensación de agua, para evitar la putrefacción de la madera en ellas.

(4) FUENTE: Argüelles, R. / Arriaga, F. Estructuras de madera: Diseño y cálculo. 1996. AITIM

(5) MLE HOMOGÉNEA: En la que todas sus láminas son de la misma clase resistente. 8

Sin embargo, existe otro comportamiento de la madera, derivado de los cambios de humedad, que debe ser determinante en el diseño de las uniones, y es su variación de volumen. Si no existe agua libre en el interior de las fibras, al aumentar el grado de humedad en la madera, esta se hincha, mientras que cuando disminuye dicho grado, se contrae.

Debido a la ortotropía de la madera, esta variación de volumen no se produce de forma homogénea en todas sus direcciones, sino que, de forma inversa a su resistencia, la variación es mucho mayor en las direcciones tangencial y radial (en torno al 50-60% de la tangencial), siendo en la dirección axial prácticamente despreciable. Esto significa que, en piezas de grandes escuadrías, las variaciones pueden ser muy importantes. Para ver la influencia que puede tener esto en la realidad, se plantea un caso hipotético:

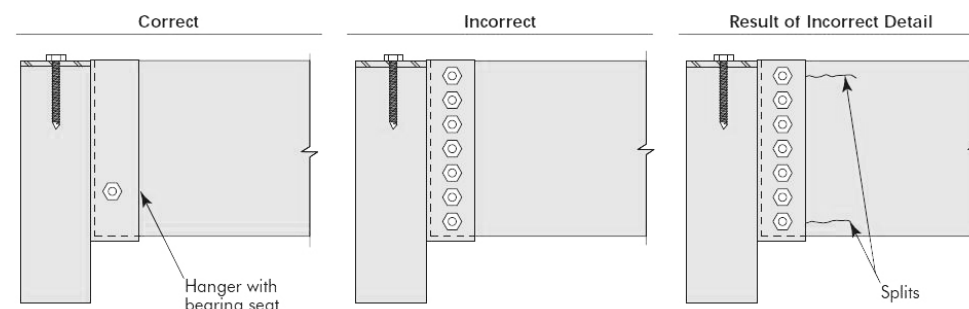
Para la mayoría de las coníferas se puede tomar como coeficiente de contracción unitaria transversal el valor de 0.2% por cada 1 % de reducción de humedad <sup>(6)</sup>. Por tanto, para una variación del 10% de humedad, una viga de madera laminada de sección 50 x 20 cm, se obtendría un aumento o disminución de dichas longitudes de un 8%, es decir, la nueva sección tendría un canto de 49 o 51 cm, y un ancho de 19.6 o 20.4 cm (según si la humedad aumenta o disminuye).

Puede parecer que esas variaciones son pequeñas, pensando a gran escala; sin embargo, observándolas desde el punto de vista de la unión, esto cambia. Si la unión está resuelta mediante un herraje fijado por medio de muchas clavijas alineadas en perpendicular a la fibra, dichos elementos metálicos resisten el cortante provocado por la madera, impidiéndola moverse libremente y provocando el agrietamiento de la misma. Debido a esto, y especialmente en el diseño de uniones rígidas (en las que se restringe mucho más el desplazamiento de la madera), debe tenerse muy en cuenta no limitar estos movimientos en el canto ni en el ancho de la pieza.

Esto puede conseguirse mediante el uso de herrajes más pequeños, en franjas longitudinales, en lugar de utilizar un único herraje para toda la sección, o bien fijándolo únicamente por debajo de la fibra neutra del elemento (si se quiere obtener un nudo menos rígido o articulado). El número de herrajes y de clavijas dependerá del resultado estructural que se pretenda obtener con la unión (transmisión de flectores o únicamente de axiles).

<sup>(6)</sup> FUENTE: Argüelles, R. / Arriaga, F. Estructuras de madera: Diseño y cálculo. 1996. AITIM

BEAM-TO-BEAM CONNECTION



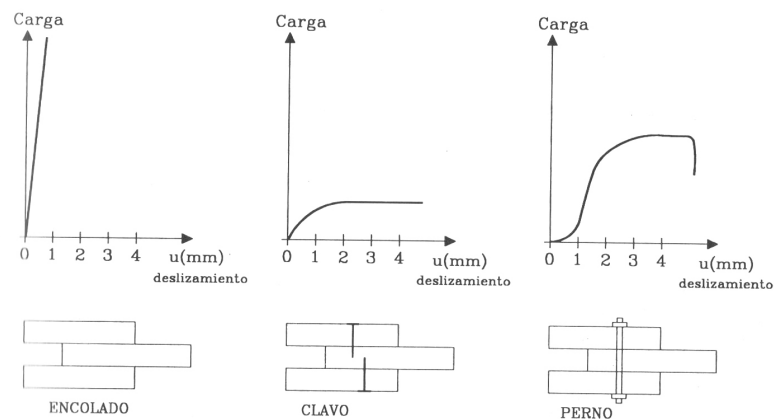
I. 12. Agrietamiento de la madera debido a uniones demasiado restrictivas

c) Desplazamiento en las uniones:

Un aspecto que tampoco debe pasar desapercibido es el hecho de que, en la mayoría de las uniones en madera, sus piezas deben deslizarse para que la unión entre en carga, debido a que los esfuerzos se transmiten por aplastamiento de la madera contra el elemento de enlace (clavijas, conectores). Sin embargo, siendo este desplazamiento necesario, puede conducir a deformaciones mayores a las previstas si no se tiene en cuenta este fenómeno. Además, esto también afecta a la resistencia de la unión en sí, siendo esta normalmente menor a la resistencia neta, considerada la suma de las resistencias de sus elementos.

El deslizamiento depende del tipo de unión, y puede cuantificarse de forma pormenorizada. En las normas UNE referentes a cada unión se indica cómo calcularlo, por lo que debemos recurrir a ella siempre que calculemos la capacidad resistente de estas uniones.

También puede resultar problemático el hecho de contar con uniones de distintos tipos dentro de la misma estructura: por ejemplo, una unión encolada entre la viga y el pilar de un pórtico, junto con una mecánica mediante herraje y pernos para el apoyo sobre la cimentación. La unión encolada es muchísimo más rígida que la mecánica, ya que no precisa prácticamente de desplazamiento para su puesta en funcionamiento, mientras que sí lo hace la mecánica. En el caso expuesto, el deslizamiento del apoyo sobre la cimentación solo afectaría en un descenso del pórtico, que no influiría en la encolada.

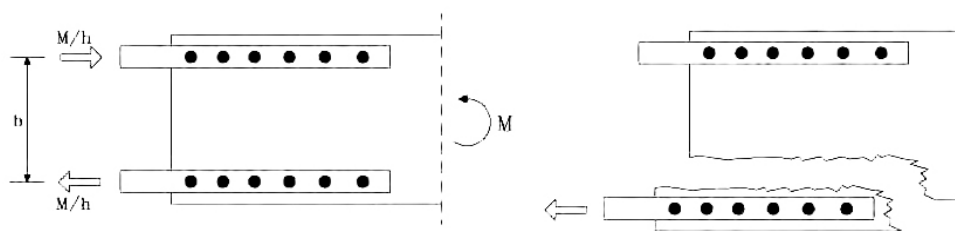


I. 13. Deslizamiento de los distintos tipos de uniones en función de la carga

#### d) Desgarramiento en las uniones:

Cuando se diseñan uniones en las que las que los elementos metálicos se colocan muy concentrados en zonas concretas de la pieza de madera, o en una o varias hileras muy separadas entre sí, puede ocurrir que se desgarre una de esas zonas sin llegar al agotamiento de cada elemento individualmente.

Esto puede ocurrir, por ejemplo, en piezas de grandes escuadrías sometidas a esfuerzos significativos, en las que las deformaciones son grandes y la rigidez de esas uniones tan concentradas evitan que esas zonas se deformen conforme al resto de la pieza, desgarrándose de la misma. Para evitar que esto ocurra, debemos cuidar las distancias entre clavijas, no reduciéndolas demasiado. En cualquier caso, se debe comprobar la posibilidad de desgarramiento en la unión, mediante el procedimiento establecido en el Eurocódigo 5 Parte 1-1 Anexo A.



I. 14. Ejemplo de desgarramiento en unión fijada mediante dos herrajes y clavijas metálicas

## 3. ESTADO DEL ARTE

### 3.2. CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS EN LAS UNIONES

#### 3.3. NORMATIVA DE APLICACIÓN

Para realizar cálculos y comprobaciones en este estudio, es evidente que debía analizarse el ámbito normativo, tanto de obligado cumplimiento como opcional, para conocer los requerimientos y recomendaciones propuestas en estas normativas. El ámbito sería España, siendo este parte de la Unión Europea y, por tanto, sujeto a la normativa nacional e internacional.

Lógicamente, al tratarse de análisis estructural, debe cumplirse lo correspondiente en el Código Técnico de la Edificación, es decir, el Documento Básico de Seguridad Estructural, así como la Norma de Construcción Sismorresistente en Edificación (NCSE-02).

En cuanto a la materialidad específica estudiada en este caso, el CTE desarrolla los aspectos de estructuras de madera en su Documento Básico – Seguridad Estructural – Estructuras de Madera. Dicha norma es muy deudora del Eurocódigo 5, el cual contiene recomendaciones en el análisis y el cálculo de este tipo de estructuras y sus uniones de forma muy desarrollada; de hecho, la mayoría de bibliografía encontrada sobre cálculo en este ámbito hace referencia a dicho Eurocódigo y a muchas de sus fórmulas.

Sin embargo, debido a la gran cantidad de normas UNE dedicadas a este ámbito, muchas de ellas bastante específicas, se ha hecho una recopilación de todas ellas, así como del resto de documentos mencionados, clasificándolos en función de qué aspectos concretos tratan, para facilitar la búsqueda de información a posibles futuras investigaciones.

A pesar de que el ámbito del trabajo se ciñe a un ámbito concreto, se considera conveniente añadir un apartado de normas más generales, ya que incluyen recomendaciones e información fundamental para entender las estructuras de madera, cómo se denominan y clasifican las distintas maderas, sus calidades, su durabilidad... Conceptos que, aunque no se apliquen directamente en el diseño y análisis de nudos, están presentes en el proceso previo.

#### NORMAS GENERALES SOBRE MADERA LAMINADA Y ASERRADA:

- 1) Clasificación visual de madera aserrada para uso estructural:
  - UNE 56544 (2011): Madera de coníferas.
  - UNE 56546 (2013): Madera de frondosas.
  - UNE-EN 1912 (2012): Asignación de especies y clases resistentes.
- 2) Determinación de propiedades mecánicas de madera aserrada y laminada para uso estructural:
  - UNE-EN 384 (2010): Valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad en madera estructural (ensayos).
  - UNE-EN 408 (2012): Algunas propiedades físicas y mecánicas en madera aserrada y laminada encolada (ensayos).
- 3) Determinación de la durabilidad natural de especies de madera:
  - UNE-EN 350-1 y 350-2 (1995): Principios y durabilidad de especies de madera importantes en Europa (ensayos).
  - UNE CEN/TR 14734 IN (2008): Impregnabilidad de las especies de madera por productos protectores y métodos de laboratorio (ensayos).
  - UNE-EN 927-6 (2007): Envejecimiento artificial de los recubrimientos para madera (ensayos).
- 4) Control de calidad de la madera:
  - UNE-EN 13183-1 Y 13183-2 (2002): Contenido de humedad en madera aserrada por medio de secado en estufa y por resistencia eléctrica (ensayos).
  - UNE-EN 302 (2013): Adhesivos para madera de uso estructural y métodos de ensayo (ensayos).
- 5) Diseño y cálculo de estructuras de madera:
  - Eurocódigo 5: Reglas generales para la edificación (parte 1.1), proyecto de estructuras sometidas a fuego (parte 1.2) y puentes (parte 2).
  - CTE DB SE-M (2009): Código Técnico de la Edificación, Documento Básico, Seguridad estructural Madera.
  - UNE-EN 14080 (2013): Requisitos para aserrada y laminada encolada (ensayos).

#### NORMAS ESPECÍFICAS SOBRE UNIONES EN MADERA:

- 1) Control de calidad de empalmes por unión dentada de madera laminada encolada; determinación de resistencia de la unión:
  - UNE-EN 408 (2012): ya mencionada.
  - UNE-EN 385 (2002): Empalmes por unión dentada, especificaciones y requisitos mínimos de fabricación (ensayos).
- 2) Uniones mediante clavijas:
  - UNE-EN 383 (2007): Determinación de la resistencia al aplastamiento en elementos tipo clavija (ensayos).
  - UNE-EN 409 (2009): Determinación del momento plástico para los elementos de fijación tipo clavija (ensayos).
  - UNE-EN 26891 (1992): Determinación de valores característicos de resistencia y módulo de deslizamiento en uniones mediante elementos metálicos de fijación.
  - UNE-EN 1380 (2009): Valores característicos de resistencia y rigidez en uniones con clavos, tornillos, clavijas y pernos (ensayos).
  - UNE-EN 1381 (2000): Uniones grapadas (ensayos).
- 3) Uniones mediante conectores:
  - UNE-EN 912 (2011): Especificaciones de los conectores para madera.
  - UNE-EN 13271 (2004): Valores característicos de resistencia y módulo de deslizamiento de uniones con conectores.



4.1. BASE DE DATOS: PROYECTOS EN MADERA LAMINADA

Con el objetivo de llegar a un conocimiento más cercano a la realidad de qué tipos de uniones se llevan a cabo en la realidad y a qué tipos estructurales suelen asociarse, se han recopilado una serie de proyectos cuya estructura está ejecutada en madera laminada. Primero se completan unas tablas, en las cuales se proporcionan datos representativos de los proyectos recopilados, y se hace referencia a las soluciones de nudos que presentan.

Después se adjunta una tabla en la que se identifica y define cada una de estas soluciones de nudos, haciendo referencia a las mismas por medio de un código asignado a cada uno. Por último, se han realizado una serie de fichas, de los proyectos más representativos de la base de datos, acompañadas de una descripción de la estructura de cada proyecto y de fotografías de sus uniones.

NOMBRE	PROYECTISTA	LUGAR	FECHA PROYECTO	FECHA FIN EJECUCIÓN	CLASE RESISTENTE	TIPO ESTRUCTURAL	NUDO 1	NUDO 2	NUDO 3	NUDO 4
Archivo provincial	-	Jaén (España)	2011	-	-	Emparrillado plano	N1R02	N2R03	N3A04	N4A03
Biblioteca pública	Helen and Hard	Vennesla (Noruega)	-	2011	-	Pórticos	-	N2R04	-	-
Bodegas Protos	Richard Rogers, Alonso y Balaguer	Peñafiel (España)	-	2008	-	Arcos	N1R03	-	N3A04	N4A02
Centro comercial Itaroa	L35 Arquitectos	Huarte (España)	2002	2004	-	Cerchas pretensadas	-	N2A01	N3A01	-
Centro comercial M&S Cheshire Oaks	Aukett Fitzroy Robinson	Ellesmere Port (Reino Unido)	-	2012	GL24h	Emparrillado curvo	-	N2A02	N3A01	-
Colegio San Francisco Javier	Hurtado Covarrubias & Quintana Felice Arquitectos	Puerto Montt (Chile)	2007	2009	-	Pórticos	N1R02	N2A03	N3A03	-
Granja nido de cigüeñas	SGL Projekt	Olbramovice (República Checa)	-	2010	-	Pórticos radiales	-	-	N3A03	N4A04
Las Arenas	Richard Rogers, Alonso y Balaguer	Barcelona (España)	2000	2011	GL32h, GL28h,	Malla triangulada en cúpula	-	-	N3A04	-
Mercado público	Carles Muro y Charmaine Lay	Inca (España)	2000	2009	-	Cerchas	N1A01	N2R03	N3A02	N4A03
Metropol Parasol Encarnación	Jürgen Mayer	Sevilla (España)	2005	2011	-	Emparrillado tridimensional	-	-	N3A06	N4A03
Mirador para la Bundesgartenschau	Dethier Architecture	Koblenz (Alemania)	2009	2011	-	Cerchas	-	N2A02	N3A04	N4A04
Museo del Jurásico	Rufino Uribe Larrea	Asturias	0	2004	-	Arcos (Bidireccional)	N1A01	-	N3A03	-
Museo y puente	Kengo Kuma y asociados	Yusuhara (Japón)	0	2011	-	Entramado en ménsula sobre pilares	-	-	N3A01	-

NOMBRE	PROYECTISTA	LUGAR	FECHA PROYECTO	FECHA FIN EJECUCIÓN	CLASE RESISTENTE	TIPO ESTRUCTURAL	NUDO 1	NUDO 2	NUDO 3	NUDO 4
Pabellón de Finlandia	Jaaskelainen, Kaakko, Rouhiainen, Sanaksenaho y Tirkknen	Sevilla (España)	1990	1991	-	Pórticos	N1R02	N2R03	-	N4A04
Pabellón de Hungría	Imre Makovecz	Sevilla (España)	1990	1991	-	Pórticos curvos	-	-	-	-
Pabellón de Japón	Tadao Ando	Sevilla (España)	1989	1992	GL24h	Entramado en ménsula sobre pilares	-	-	N3A01	-
Pabellón de la navegación	G. Vázquez Consuegra	Sevilla (España)	1989	1991	-	Pórticos curvos	N1A01	N2A01	-	-
Palacio de los deportes	Eduardo Elkouss	Torre vieja (España)	-	2000	-	Pórticos curvos	-	N2A03	N3A04	N4A04
Palacio de los deportes	Ad hoc msl arquitectos	Cartagena (España)	2001	-	-	Cerchas pretensadas	N1R02	N2A01	N3A03	N4A04
Parlamento de Escocia	Enric Miralles	Edimburgo (Escocia)	1999	2004	-	Cerchas arriostradas	-	-	-	-
Pista cubierta del CP Cardenal Illundain	Fermín Ibarrola	Pamplona (España)	2008	2011	-	Pórticos	N1R01	N2R05	N3A02	-
Polideportivo del instituto Gernika	Joseba Rementería	Gernika (España)	-	2005	-	Vigas curvas	-	N2A05	N3A02	N4A03
Puente de Crest	Yves Perret, Michaël Flach	Crest (Francia)	-	2001	GL36h	Estructura en árbol	N1A03	N1A07	N3A06	N4A04
Puente peatonal	-	Washington (EEUU)	-	-	-	Arcos	N1A01	N2A04	-	N4A01

Una tipología estructural interesante y bastante recurrente en las estructuras de madera laminada encontradas es la de pórticos curvos, en la cual se aprovecha la facilidad técnica de curvado de la madera (aprovechando el proceso de encolado de la madera para ello) para generar geometrías de pórticos de una sola pieza. Así, estructuras como la del Pabellón de la Navegación (Sevilla) o la piscina cubierta del Palacio de los Deportes de Torre vieja, realizan pórticos en L, apoyados en el nivel del suelo en un extremo y sobre un pilar de mayor altura en el otro (de otro material).

Otra tipología no tan recurrente en los proyectos estudiados pero igualmente interesante es la de estructura en árbol ya que, de este modo, se puede conseguir mucha inercia con escuadrías mucho más reducidas.

Es importante, tanto en los pórticos curvos como en las estructuras en árbol, que las uniones puedan absorber ángulos oblicuos. En este sentido, si el vínculo es articulado, la solución más sencilla es la de orejeta en pasador, bastante utilizada en este tipo de situaciones.

Como continuación al estudio de proyectos con estructuras de madera laminada, se ha realizado un estudio pormenorizado de las uniones que se emplea en cada uno de ellos, así como un recuento para poder denotar qué soluciones son más recurrentes. Debido a que la base de datos es de extensión muy reducida, los resultados no pueden ser considerados como tendencias claras o como expresión de una mejor o peor resolución de ciertos tipos de nudos. También se añaden otras soluciones que, a pesar de no aparecer en ninguno de los proyectos, son interesantes a efectos de análisis y algunos de ellos se estudiarán posteriormente.

## 4. ESTUDIO DE CASOS

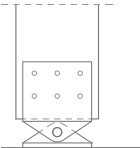
### 4.1. BASE DE DATOS: PROYECTOS EN MADERA LAMINADA

Debido a la gran variedad de circunstancias y posibilidades de materiales y geometrías, en la unión viga-soporte se concentran el mayor número de soluciones distintas, mientras que en las uniones soporte-cimentación o correa-viga las opciones están bastante más estandarizadas. Sobre todo en el segundo caso, existen varias soluciones que se utilizan prácticamente en todos los casos, dependiendo de si se busca un herraje visto u oculto. Cada casa comercial ofrece su modelo, que puede variar en el tipo de aleación, en el número de clavijas de fijación o ligeramente en las dimensiones, pero cuyo concepto es siempre el mismo.

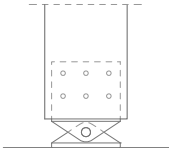
ELEMENTOS UNIDOS	SIMPLE O MÚLTIPLE	TIPO DE NUDO	TIPO DE UNIÓN	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	RECuento BASE DE DATOS
N1. SOPORTE + CIMENTACIÓN	Ambos	Articulado	Mecánica - Herraje	Herraje visto, en U o en caja, fijado mediante clavijas al soporte y mediante orejeta en pasador y placa a la cimentación	N1A01	4
	Ambos	Articulado	Mecánica - Herraje	Herraje oculto, una o varias placas empotradas en testa fijadas con clavijas al soporte, y mediante orejeta en pasador y placa a cimentación	N1A02	0
	Ambos	Articulado	Barras encoladas	Varias barras encoladas empotradas en testas de pilares y soldadas a herraje con orejeta en pasador, fijada a placa anclada en cimentación	N1A03	1
	Ambos	Empotrado	Mecánica - Herraje	Herraje oculto, una o varias placas empotradas en testa fijadas con clavijas al soporte, y atornillado o soldado a placa anclada en cimentación	N1R01	1
	Simple	Articulado/ Empotrado	Mecánica - Herraje	Herraje visto, en U o en caja, fijado mediante clavijas al soporte y atornillado o soldado a placa anclada en cimentación	N1R02	4
	Ambos	Empotrado	Mecánica - Herraje	Herraje oculto mediante pieza metálica triangular y placas soldadas a la misma y empotradas en las testas de los soportes mediante clavijas	N1R03	1
	RECuento TOTAL NUDOS CONOCIDOS BASE DE DATOS					11

ELEMENTOS UNIDOS	SIMPLE O MÚLTIPLE	TIPO DE NUDO	TIPO DE UNIÓN	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	RECuento BASE DE DATOS
N2. VIGA + SOPORTE	Simple	Articulado	Mecánica - Herraje	Herraje visto en U, fijado mediante clavijas a la viga y con orejeta en pasador y placa al soporte	N2A01	3
	Ambas	Articulado	Mecánica - Herraje	Herraje oculto mediante placa metálica empotrada en la testa de cada viga y unida al soporte mediante orejeta en pasador	N2A02	2
	Simple	Articulado	Mecánica - Herraje	Herraje visto rectangular o poligonal, situado en dos caras opuestas de la madera, fijado a ambos elementos mediante clavijas	N2A03	2
	Simple	Articulado	Mecánica - Herraje	Herraje visto en caja, fijado mediante clavijas a la madera y mediante esfera metálica al soporte	N2A04	1
	Simple	Articulado	Mecánica - Clavijas	Soporte solapado con la viga y fijado a la misma mediante clavijas bajo su fibra neutra	N2A05	1
	Ambos	Articulado	Barras encoladas	Varias barras encoladas empotradas en testas de viga y pilar y soldadas a herraje común	N2A07	1
	Simple	Rígido	Mecánica - Clavijas	Solape completo entre viga y pilar y fijación mediante corona de pernos	N2R01	0
	Simple	Rígido	Mecánica - Herraje	Herraje visto en U, fijado mediante clavijas a la viga y soldado o atornillado a placa en soporte	N2R02	0
	Ambos	Rígido	Mecánica - Herraje	Herraje oculto mediante una o varias placas metálicas empotradas en cada pieza de madera y fijadas con clavijas	N2R03	3
	Simple	Rígido	Encolada	Continuidad entre viga y soporte mediante unión encolada macrodentada	N2R04	1
	Simple	Rígido	Mecánica - Clavijas	Solape completo entre viga y pilar empresillado doble, fijados mediante clavijas	N2R05	1
	RECuento TOTAL NUDOS CONOCIDOS BASE DE DATOS					15

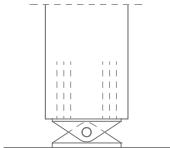
ELEMENTOS UNIDOS	SIMPLE O MÚLTIPLE	TIPO DE NUDO	TIPO DE UNIÓN	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	RECuento BASE DE DATOS
N3. VIGA + VIGA/CORREA	Simple	Articulado	Mecánica - Clavijas	Correas pasantes, apoyadas sobre las vigas y atornilladas a las mismas en su cara superior	N3A01	4
	Simple	Articulado/Rígido	Mecánica - Herraje	Herraje visto en U, fijado a correa y viga mediante clavijas, cuya rigidez depende de la cantidad de fijaciones	N3A02	2
	Simple	Articulado/Rígido	Mecánica - Herraje	Herraje visto mediante dos angulares colocados a ambos lados de la correa/viga sustentada y fijados a todos los elementos mediante clavijas	N3A03	4
	Simple	Articulado/Rígido	Mecánica - Herraje	Herraje oculto en T, empotrado en la testa de la correa/viga sustentada y fijado a todos los elementos mediante clavijas	N3A04	5
	Múltiple	Articulado/Rígido	Mecánica - Herraje	Herraje mediante fragmento de tubular metálico al que se sueldan placas de acero, empotrándolas en las testas de las vigas	N3A05	0
	Múltiple	Articulado/Rígido	Barras encoladas	Varias barras encoladas empotradas en las testas de cada viga y soldadas a herraje común	N3A06	2
	RECuento TOTAL NUDOS CONOCIDOS BASE DE DATOS					17
N4. OTROS ELEMENTOS	Simple	Rótula	Mecánica - Herraje	Rótula en viga continua mediante herraje en caja y orejeta en pasador en cada testa	N4A01	1
	Simple	Rótula	Mecánica - Herraje	Herraje oculto mediante placa empotrada en testa de vigas y orejeta en pasador entre ellas	N4A02	1
	Ambos	Articulado	Mecánica - Herraje	Herraje mediante orejeta, para sujeción de perfil/tirante de arriostamiento, y fijado a la viga/soporte de madera mediante placa y clavijas	N4A03	4
	Ambos	Articulado	Mecánica - Herraje	Orejeta para sujeción de perfil/tirante de arriostamiento, soldada a herraje existente	N4A04	6
	RECuento TOTAL NUDOS CONOCIDOS BASE DE DATOS					12



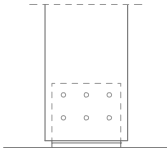
N1A01



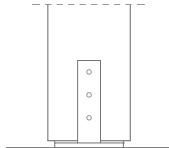
N1A02



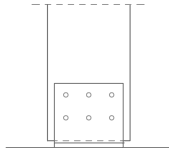
N1A03



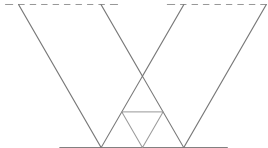
N1A02



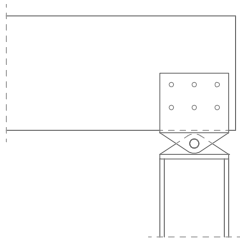
N1R02  
(articulado)



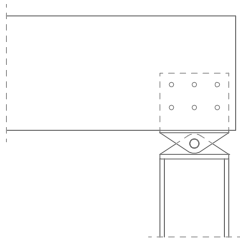
N1R02  
(rígido)



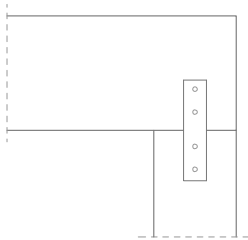
N1R03



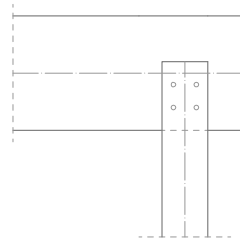
N2A01



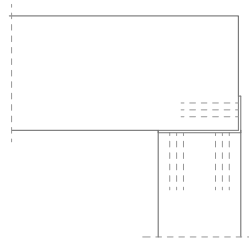
N2A02



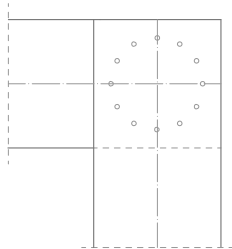
N2A03



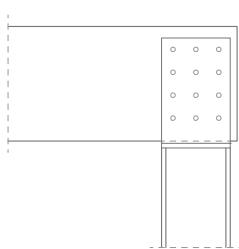
N2A05



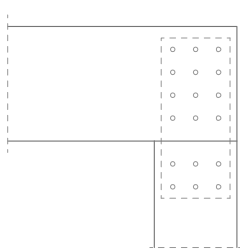
N2A07



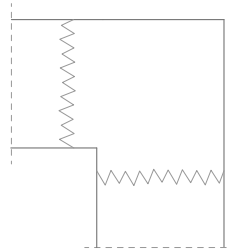
N2R01



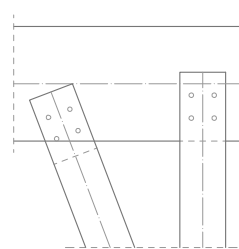
N2R02



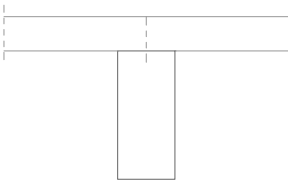
N2R03



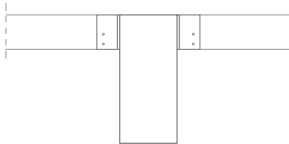
N2R04



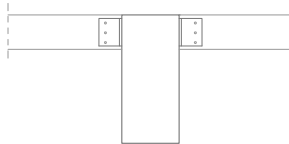
N2R05



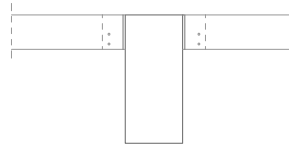
N3A01



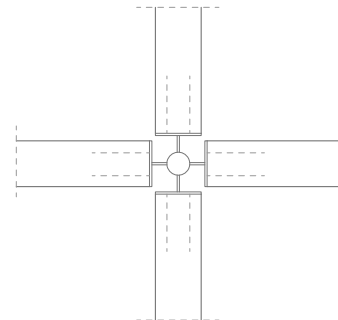
N3A02




N3A03





N3A04



N3A06  
(en planta)

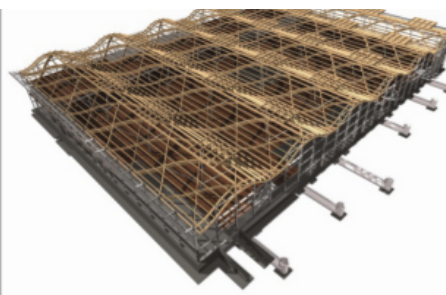
NOMBRE	Bodegas Protos				
PROYECTISTA	Richard Rogers, Alonso y Balaguer				
LUGAR	Peñafiel (España)				
FECHA PROYECTO	-	Estructura formada por arcos parabólicos de madera laminada, apoyados directamente sobre cimentación en algunas zonas y sobre pilastras de hormigón armado en otras zonas (mayor altura libre).			
FECHA FIN EJECUCIÓN	2008				
TIPO DE UNIÓN	Mecánica - Herraje	NUDO 1	N1R03	NUDO 3	N3A04
TIPO ESTRUCTURAL	Arcos	NUDO 2	-	NUDO 4	N4A02

NOMBRE	Centro comercial Itaroa				
PROYECTISTA	L35 Arquitectos				
LUGAR	Huarte (España)				
FECHA PROYECTO	2002	Estructura mixta formada por pilares de acero y cerchas planas cuya barra superior es una viga de madera laminada y el cordón inferior y los montantes son tubulares de acero. Se salva así una gran luz con canto más reducido.			
FECHA FIN EJECUCIÓN	2004				
TIPO DE UNIÓN	Mecánica - Herraje	NUDO 1	-	NUDO 3	N3A01
TIPO ESTRUCTURAL	Cerchas pretensadas	NUDO 2	N2A01	NUDO 4	-



4.1. BASE DE DATOS: PROYECTOS EN MADERA LAMINADA

NOMBRE	Centro comercial M&S Cheshire Oaks
PROYECTISTA	Aukett Fitzroy Robinson
LUGAR	Ellesmere Port (Reino Unido)



FECHA PROYECTO -  
FECHA FIN EJECUCIÓN 2012

Vigas de madera laminada de picea europea en dos direcciones ortogonales formando un emparrillado que se curva en el espacio. Este se apoya sobre pilares de acero en árbol en los puntos más bajos de las curvas, reduciendo la luz máxima.

TIPO DE UNIÓN Mecánica - Herraje  
TIPO ESTRUCTURAL Emparrillado curvo

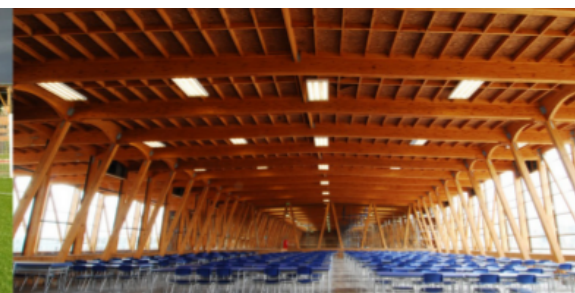
NUDO 1 -

NUDO 3 N3A01

NUDO 2 N2A02

NUDO 4 -

NOMBRE	Colegio San Francisco Javier
PROYECTISTA	Hurtado Covarrubias & Quintana Felice Arquitectos
LUGAR	Puerto Montt (Chile)



FECHA PROYECTO 2007  
FECHA FIN EJECUCIÓN 2009

Pórticos sobre muro de contención de hormigón armado, formados por vigas horizontales y pilares dobles en V formando nudo rígido en su conjunto. Arriostamiento entre pórticos por medio de vigas transversales entre ellos.

TIPO DE UNIÓN Mecánica - Herraje  
TIPO ESTRUCTURAL Pórticos

NUDO 1 N1R02

NUDO 3 N3A03

NUDO 2 N2A03

NUDO 4 -



NOMBRE	Mercado público	 
PROYECTISTA	Carles Muro y Charmaine Lay	
LUGAR	Inca (España)	

FECHA PROYECTO	2000	<p>Estructura triangulada de madera, apoyada sobre pilastras de hormigón. Todos los elementos de las cerchas son de madera laminada unidos por herrajes ocultos. Las cerchas reducen su canto al llegar a los apoyos, teniendo la máxima inercia en el centro.</p>
FECHA FIN EJECUCIÓN	2009	

TIPO DE UNIÓN	Mecánica - Herraje	NUDO 1	N1A01	NUDO 3	N3A02
TIPO ESTRUCTURAL	Cerchas	NUDO 2	N2R03	NUDO 4	N4A03

NOMBRE	Metropol Parasol Encarnación	 
PROYECTISTA	Jürgen Mayer	
LUGAR	Sevilla (España)	

FECHA PROYECTO	-	<p>Estructura de grandes dimensiones, cuyo uso es el de mirador, cuyo emparrillado de madera se fija a dos núcleos verticales de hormigón en algunas zonas y en otras su canto va aumentando para generar nuevos apoyos.</p>
FECHA FIN EJECUCIÓN	2011	

TIPO DE UNIÓN	Barras encoladas	NUDO 1	-	NUDO 3	N3A06
TIPO ESTRUCTURAL	Emparrillado tridimensional	NUDO 2	-	NUDO 4	N4A03

NOMBRE	Mirador para la Bundesgartenschau	
PROYECTISTA	Dethier Architecture	
LUGAR	Koblenz (Alemania)	

FECHA PROYECTO 2009  
FECHA FIN EJECUCIÓN 2011

La pasarela, apoyada únicamente en 5 apoyos y con grandes zonas en ménsula, se sostiene por medio de dos cerchas perimetrales cuyo canto es toda la altura del espacio generado.


TIPO DE UNIÓN Mecánica - Herraje  
TIPO ESTRUCTURAL Cerchas

NUDO 1 -

NUDO 3 N3A04

NUDO 2 N2A02

NUDO 4 N4A04

NOMBRE	Museo del Jurásico	
PROYECTISTA	Rufino Uribe Larrea	
LUGAR	Asturias (España)	

FECHA PROYECTO -  
FECHA FIN EJECUCIÓN 2004

Con forma de huella tridáctila, su estructura se compone de un entramado de arcos ortogonales entre sí, apoyados sobre un basamento de hormigón. Los encuentros entre los tres espacios se resuelven con arcos oblicuos a estos.

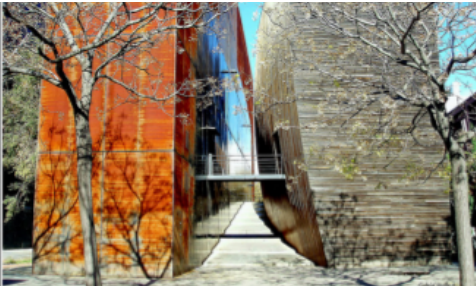


TIPO DE UNIÓN Mecánica - Herraje  
TIPO ESTRUCTURAL Arcos (Bidireccional)

NUDO 1 N1A01

NUDO 3 N3A03

NUDO 2 -

NUDO 4 -

NOMBRE	Pabellón de Finlandia Expo '92			
PROYECTISTA	Jaaskelainen, Kaakko, Rouhiainen, Sanaksenaho y Tirkknen			
LUGAR	Sevilla (España)			

FECHA PROYECTO 1990  
FECHA FIN EJECUCIÓN 1991

Debido a la gran escala del edificio y a su concepto, su estructura se asemeja a la de los barcos de madera, por medio de pórticos rígidos y de grandes escuadrías. Los herrajes quedan ocultos en las zonas que la estructura es visible.

TIPO DE UNIÓN Mecánica - Herraje  
TIPO ESTRUCTURAL Pórticos

NUDO 1 N1R02

NUDO 3 -

NUDO 2 N2R03

NUDO 4 N4A04

NOMBRE	Pabellón de la navegación		
PROYECTISTA	G. Vázquez Consuegra		
LUGAR	Sevilla (España)		

FECHA PROYECTO 1989  
FECHA FIN EJECUCIÓN 1991

En su estructura se combinan vigas curvas apoyadas sobre la cimentación en un lado, y sobre pórticos de hormigón armado en el opuesto. Dicho apoyo no se produce en el extremo de la viga sino desplazado del mismo, dejando una parte en ménsula.

TIPO DE UNIÓN Mecánica - Herraje  
TIPO ESTRUCTURAL Pórticos curvos

NUDO 1 N1A01

NUDO 3 -

NUDO 2 N2A01

NUDO 4 -



NOMBRE	Polideportivo del instituto Gernika	 
PROYECTISTA	Joseba Rementería	
LUGAR	Gernika (España)	

FECHA PROYECTO -  
FECHA FIN EJECUCIÓN 2005

Se trata de una estructura mixta, en la que las vigas de madera son curvas y se apoyan en sus puntos más bajos en los pilares tubulares de acero. Los pilares se dividen en V para reducir la luz máxima.

TIPO DE UNIÓN Mecánica - Herrajes

NUDO 1 -

NUDO 3 N3A02

TIPO ESTRUCTURAL Vigas curvas

NUDO 2 N2A05

NUDO 4 N4A03

NOMBRE	Puente de Crest	 
PROYECTISTA	Yves Perret, Michaël Flach	
LUGAR	Crest (Francia)	

FECHA PROYECTO -  
FECHA FIN EJECUCIÓN 2001

Tablero formado por 4 vigas de gran canto, arriostradas mediante diagonales también de madera laminada, apoyadas sobre soportes ramificados de madera. Estos soportes se anclan a unas pilastras de hormigón, que resuelven el encuentro con el suelo.

TIPO DE UNIÓN Barras encoladas

NUDO 1 N1A03

NUDO 3 N3A06

TIPO ESTRUCTURAL Estructura en árbol

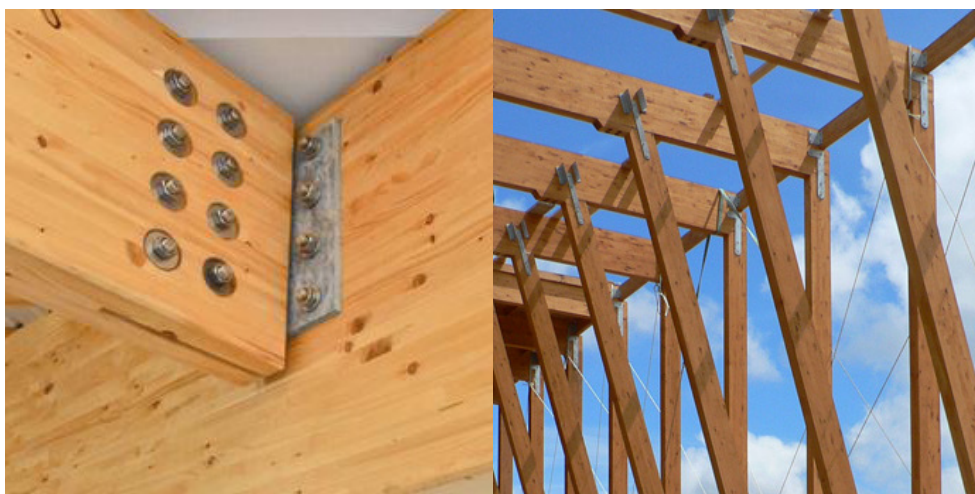
NUDO 2 N1A07

NUDO 4 N4A04

Un aspecto sorprendente es el hecho de que, después de ver muchos proyectos cuya estructura está realizada con madera laminada, se observa una predominancia total de las soluciones con herrajes o placas metálicas, frente a las demás.

Mientras que la bibliografía consultada, sobre todo la más antigua, se centra muchísimo en el cálculo de la capacidad resistente de uniones clavadas mediante clavijas, e incluso en algunas uniones carpinteras (el embarbillado es el más recurrente) y en las soluciones de barras encoladas, no se entra en mucho detalle en las soluciones con herrajes. Sin embargo, hoy en día es prácticamente la solución más empleada por su versatilidad: solo variando sus dimensiones y su cantidad de fijaciones a la madera, se adquieren unos valores de rigidez totalmente distintos, que afectan de forma determinante a la estructura.

También es interesante recurrente la solución mostrada en la segunda fotografía (derecha), en la cual, a partir de dos pilares muy esbeltos y articulados a la viga, se genera una restricción equiparable a un nudo rígido, obteniendo así una viga de canto también menor.



I. 15. Solución más rígida mediante fijación con dos columnas de pernos a lo largo de todo el canto. Centro comercial M&S Cheshire Oaks.

I. 16. Solución articulada mediante herraje muy alargado y fijado únicamente en una fila de clavijas. Colegio San Francisco Javier.

## 4. ESTUDIO DE CASOS

### 4.2. ANÁLISIS BASE DE DATOS: SOLUCIONES MÁS UTILIZADAS

Otra ventaja que ofrece el uso de acero en las uniones es la facilidad para diseñar elementos que puedan resolver encuentros entre múltiples elementos, algo mucho más difícil con los demás sistemas (clavado, encolado), sobre todo si los diferentes elementos forman ángulos oblicuos entre sí. Las uniones mediante barras encoladas también permiten realizar este tipo de uniones, dejando visibles únicamente los herrajes a los que se anclan dichas barras.



I. 17. Unión múltiple para soporte ramificado en árbol, cuyo refuerzo permite estilizar las barras en sus extremos. Refectorio de la catedral de Norwich, Reino Unido.

I. 18. Herraje en estrella que permite la unión de múltiples barras, con posibilidad de desmontaje. Esta solución ha sido empleada en cúpulas geodésicas desmontables.



I. 19. Unión múltiple mediante barras encoladas en cada elemento de madera. Puente de Crest, Francia.



El cálculo para el análisis de las distintas soluciones de nudos elegidas se realiza mediante el programa de cálculo de elementos finitos SAP2000 versión 15.1.0. A lo largo de los siguientes apartados se presentará tanto la información previa necesaria para el cálculo como algunos diagramas obtenidos del mismo, en caso de que sean necesarios para la comprensión del análisis. El resto de diagramas y documentación de los cálculos realizados se encuentran en su anexo correspondiente.

#### a) Materiales utilizados para el cálculo:

En primer lugar, como ya se ha explicado anteriormente, la madera es un material ortótropo. Por tanto, a la hora de proporcionar sus propiedades mecánicas en el programa de cálculo, se ha tenido especialmente en cuenta este hecho.

Para comprobar hasta qué punto influye este hecho en el cálculo, se ha introducido un elemento de madera en dos hipótesis distintas: como material isótropo y como ortótropo. La madera empleada en todos los cálculos es laminada encolada homogénea GL24h, por ser la de menor resistencia de las laminadas.

Al no existir un material tipo "madera" creado en SAP2000, se introduce a partir de 6 valores característicos: peso por unidad de volumen, masa por unidad de volumen y coeficiente de expansión térmica (A), iguales en ambas hipótesis; módulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (u) y módulo de elasticidad transversal (G), cuyos valores dependen de la dirección en el caso del material ortótropo, empleando las coordenadas locales del elemento (shell, superficial, o frame, barra) para definir dichas direcciones.

Sin embargo, en la mayoría de la bibliografía consultada, el módulo de elasticidad transversal (G) se considera un valor medio único, sin diferenciar la dirección en la que se indica, así como el coeficiente de Poisson, el cual según las fuentes puede considerarse entre 0.4 y 0.25, en función de las especies y de las tolerancias, e igual en todas direcciones, o al menos no se especificaba su valor en las demás direcciones. Al utilizar estos valores en el cálculo, la distribución de tensiones en los pórticos calculados no eran coherentes con el funcionamiento habitual, repitiéndose patrones de manchas aleatorias a lo largo de la superficie de vigas y pilares en lugar de franjas en tracción o compresión.

## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNIONES MECÁNICAS

### 5.1. HIPÓTESIS PARA EL CÁLCULO

Propiedades	GL24h	Rigidez, en kN/mm <sup>2</sup>	
<b>Resistencia (característica), en N/mm<sup>2</sup></b>			
- Flexión	$f_{m,g,k}$	24	- Módulo de elasticidad paralelo medio $E_{0,g,medio}$ 11,6
- Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	16,5	- Módulo de elasticidad paralelo 5 <sup>o</sup> -percentil $E_{0,g,k}$ 9,4
- Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	0,4	- Módulo de elasticidad perpendicular medio $E_{90,g,medio}$ 0,39
- Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	24	- Módulo transversal medio $G_{g,medio}$ 0,72
- Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,7	
- Cortante	$f_{v,g,k}$	2,7	<b>Densidad, en kg/m<sup>3</sup></b>
			Densidad característica $\rho_{g,k}$ 380

I. 20. Características mecánicas para madera GL24h según CTE-SE-M

Por tanto, se investigó más en los valores de dichas propiedades, para conseguir valores más concretos. Finalmente, empleando dos valores diferentes para cada característica (uno para el sentido longitudinal y otro para el transversal), muy diferentes entre ellos, se ha conseguido que los diagramas de esfuerzos sean coherentes. Por tanto, los datos introducidos <sup>(7)</sup> en el programa de cálculo son los siguientes (diferenciando en vigas y pilares, ya que se toman según los ejes locales de los shell y están posicionados de la misma forma en ambos casos):

-Coeficiente de expansión térmica=  $5.00 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

-Peso por unidad de volumen=  $3.724 \text{ kN/m}^3$

#### VIGAS:

Módulo de elasticidad (kN/m<sup>2</sup>):

- $E_1 = 1.16 \cdot 10^7$

- $E_2 = E_3 = 7.25 \cdot 10^6$

#### PILARES:

Módulo de elasticidad (kN/m<sup>2</sup>):

- $E_2 = 1.16 \cdot 10^7$

- $E_1 = E_3 = 7.25 \cdot 10^6$

Módulo elasticidad trasversal (kN/m<sup>2</sup>):

- $E_{12} = E_{13} = 7.25 \cdot 10^5$

- $E_{23} = 8.36 \cdot 10^4$

Módulo elasticidad trasversal (kN/m<sup>2</sup>):

- $E_{12} = E_{23} = 7.25 \cdot 10^5$

- $E_{13} = 8.36 \cdot 10^4$

Coeficiente de Poisson:

- $E_{12} = E_{13} = 0.03$

- $E_{23} = 0.49$

Coeficiente de Poisson:

- $E_{12} = E_{23} = 0.03$

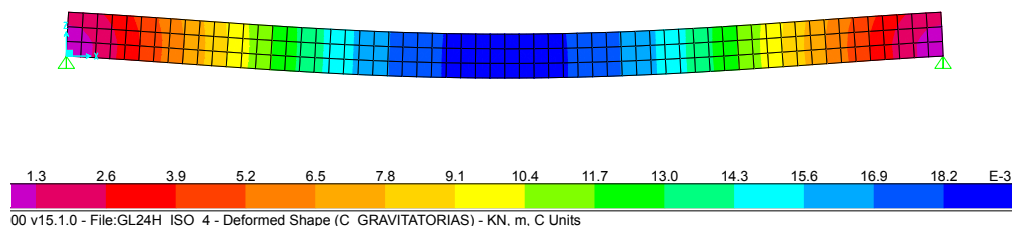
- $E_{13} = 0.49$

<sup>(7)</sup> FUENTE: González Fueyo J.L. / Cabezas Flores, J.A. / Rubio Cavero, M.P. / Domínguez Lorenzo, M. Reducción de tensiones en apoyos entallados de vigas de madera mediante empleo de pernos. 2009. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 13, Nº1 25

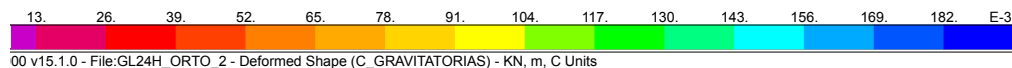
Para el cálculo comparativo entre material isótropo y ortótropo, en el primer caso se ha tomado un único valor de módulo de elasticidad (el mayor, correspondiente con la dirección axial) y del coeficiente de poisson (el valor medio de 0.3 encontrado en otras fuentes de información). Los resultados se han obtenido para una hipótesis simple de peso propio (estructura + cubierta ligera, carga según CTE y calculada en anexo de cálculo).

Se analizan a continuación los valores de deformaciones, fuerzas y esfuerzos en los dos casos para encontrar las diferencias entre ellos.

### DEFORMACIONES:

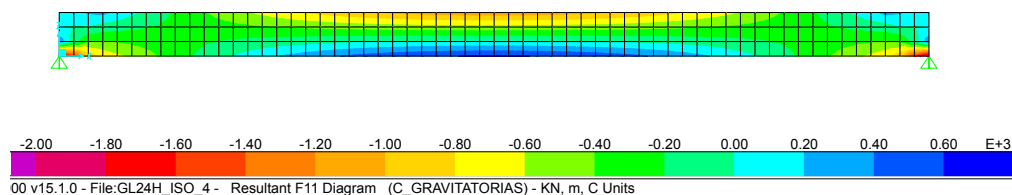


I. 21. Diagrama y valores para viga biarticulada considerando la madera como isotrópica

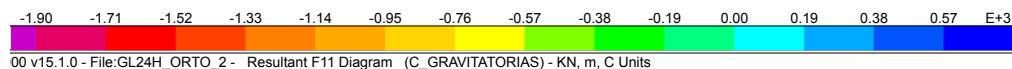


I. 22. Valores para viga biarticulada considerando la madera como ortótropa (mismo diagrama)

### F11 - FUERZAS LONTIGUDINALES:



I. 23. Diagrama y valores para viga biarticulada considerando la madera como isotrópica

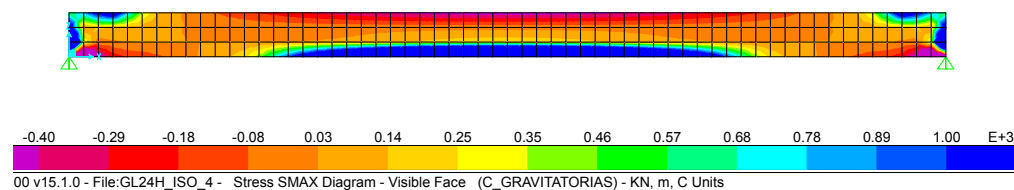


I. 24. Valores para viga biarticulada considerando la madera como ortótropa (mismo diagrama)

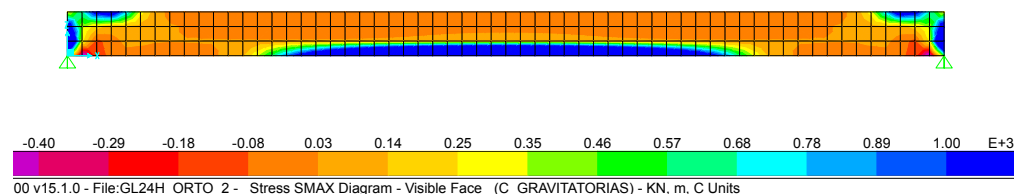
## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNIONES MECÁNICAS

### 5.1. HIPÓTESIS PARA EL CÁLCULO

#### DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS:

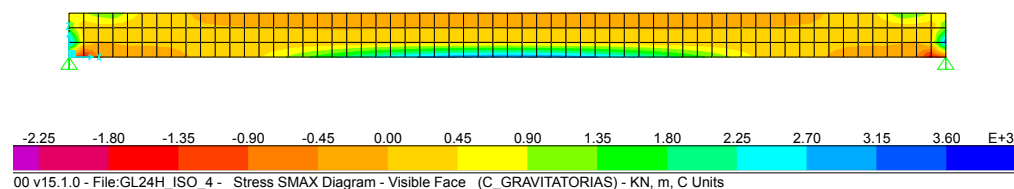


I. 25. Diagrama y valores (m. isotropa), limitando el ámbito entre -400 (compresión) y 1000 kN (tracción)

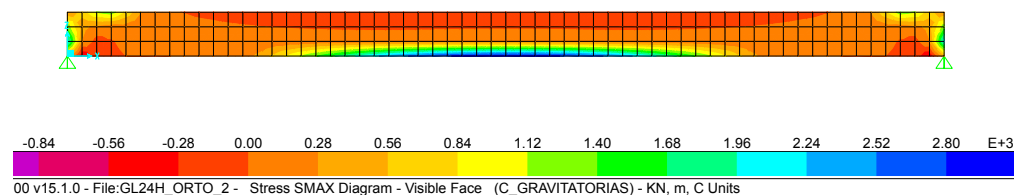


I. 26. Mismo diagrama y valores para madera ortótropa

#### TRACCIONES MÁXIMAS:



I. 27. Diagrama y valores (m. isotropa), limitando el ámbito entre -400 (compresión) y 1000 kN (tracción)



I. 28. Mismo diagrama y valores para madera ortótropa

Se observa en la comparación que, a pesar de que las distribuciones en la viga son similares, los valores sí que varían. Especialmente en las deformaciones, que son 10 veces mayores para el material ortótropo. Por tanto, se escoge esa hipótesis para el análisis de nudos, por ajustarse mejor a la realidad y tener bastante influencia en los resultados.

### b) Resistencias de cálculo:

A la hora de realizar la comprobación de Estado límite Último (ELU), debe minorarse la resistencia de la madera siguiendo dos criterios, indicados en el Código Técnico de la Edificación, Seguridad Estructural - Madera, Apartado 2.2.2.: por una parte, debe aplicarse el coeficiente de minoración del material, como en estructuras de cualquier otro material, y por otra parte debe multiplicarse por un coeficiente denominado factor de modificación o  $k_{mod}$ , el cual reduce la resistencia de la madera en función de la clase de servicio (ambiente al que está expuesta la estructura, debido al grado de humedad) y de la duración de la carga.

Así, los valores de dichos coeficientes son:

- $\gamma_M = 1.25$  (para MLE).

- $k_{mod} = 0.6$  para cargas permanentes (P. Propio)

- $k_{mod} = 0.9$  para cargas de corta duración (Sobrecarga, Viento, Nieve)

Los valores de  $k_{mod}$  se han obtenido considerando que la estructura pueda tener clase de servicio 1 (espacio interior) o 2 (espacio exterior cubierto o interior con alto grado de humedad, como piscinas cubiertas). Para las combinatorias en las que haya varias cargas con diferentes duraciones, según CTE: *"Si una combinación de acciones incluye acciones pertenecientes a diferentes clases de duración, el factor  $k_{mod}$  debe elegirse como el correspondiente a la acción de más corta duración"* <sup>(8)</sup>. Por tanto, en la combinatoria utilizada para el cálculo se utilizará la resistencia minorada por un  $k_{mod}=0.9$ .

Finalmente, las resistencias de cálculo son las siguientes (GL24h):

-Flexión (axial):  $f_{md} = 17.28 \text{ N/mm}^2$

-Tracción (axial):  $f_{td} = 11.88 \text{ N/mm}^2$

-Tracción (perp.):  $f_{t90d} = 0.29 \text{ N/mm}^2$

-Compresión (axial):  $f_{cd} = 17.28 \text{ N/mm}^2$

-Compresión (perp.):  $f_{c90d} = 1.94 \text{ N/mm}^2$

-Cortante:  $f_{vd} = 1.94 \text{ N/mm}^2$

<sup>(8)</sup> FUENTE: CTE DB SE - M. Apartado 2.2.3. Valor de cálculo de las propiedades del material y de las uniones.

## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNIONES MECÁNICAS

### 5.1. HIPÓTESIS PARA EL CÁLCULO

#### c) Cargas y combinatorias de cálculo:

Para las comprobaciones de ELU y ELS (Estado Límite de Servicio), se realizan una serie de combinatorias de las cargas permanentes y variables a las que podría someterse la estructura. Ya que el ámbito del estudio se centra en las estructuras de luces medias y cubiertas ligeras (en las cuales la madera es una solución que compite con el acero por su ligereza), las cargas y combinaciones se eligen en coherencia con esto.

Las cargas consideradas, obtenidas de CTE DB SE-AE (Acciones en la Edificación), son las siguientes:

Acciones permanentes:

-Peso propio estructura (vigas+correas)=  $1.04 \text{ kN/m}$

-Peso cubierta=  $1 \text{ kN/m}^2$

Acciones variables:

-Sobrecarga de uso (por mantenimiento)=  $0.4 \text{ kN/m}^2$

-Nieve=  $1 \text{ kN/m}^2$

-Viento - presión=  $0.7 \text{ kN/m}^2$

-Viento - succión=  $-0.5 \text{ kN/m}^2$

Convirtiéndolas a cargas lineales sobre vigas, considerando una distancia de 5 metros entre pórticos para el caso práctico:

Acciones permanentes:

-Peso propio estructura (vigas+correas)=  $1.04 \text{ kN/m}$

-Peso cubierta=  $5 \text{ kN/m}$

Acciones variables:

-Sobrecarga de uso (por mantenimiento)=  $2 \text{ kN/m}$

-Nieve=  $5 \text{ kN/m}$

-Viento - presión=  $3.5 \text{ kN/m}$

-Viento - succión=  $-2.5 \text{ kN/m}$

Las combinatorias utilizadas, escogiendo la más desfavorable para ELU y sólo con cargas permanentes para ELS (ya que sobre la estructura no hay forjado transitable, la flecha no influye tanto), son:

-ELU:  $1.35 \cdot A \cdot \text{Perman.} + 1.05 \cdot (\text{SC} + \text{Nieve}) + 1.5 \cdot \text{Viento (presión)} = 20.75 \text{ kN/m}$

-ELS:  $P \cdot \text{Propio} + P \cdot \text{Cubierta} = 6.04 \text{ kN/m}$



#### d) Dimensionamiento de pórticos:

Para la introducción de los pórticos en el programa de cálculo, primero deben decidirse sus dimensiones. En lugar de realizar un predimensionado rápido en función de la luz de sus vanos, se realiza la definición de su sección a partir de la comprobación de ELU.

Por tanto, se dimensionan las vigas para soportar el momento flector máximo al que están sometidas, en función de si sus vínculos son articulados o empotrados. Los pilares se dimensionan a axiles si están articulados (ya que sólo vamos a analizarlos a acciones verticales, para comprobarlos a esfuerzos horizontales debería considerarse la estructura en conjunto con sus arriostramientos) y a momento flector en los casos empotrados, teniendo así la misma sección que las vigas en estos casos.

El valor de la carga lineal sobre la viga ( $q$ ) es el resultante de la combinatoria más desfavorable, calculada en el apartado c.  $W$  es el módulo resistente de la sección, que al ser rectangular tiene como valor  $W = (b \cdot h^2)/6$ .

VIGAS:

##### Luz= 10 metros:

-Biarticulada:  $M_{F_{max}} = (q \cdot L^2)/8 = 259.37 \text{ kN} \cdot \text{m} < (R_{md})/W$ . Siendo  $R_{md} = 17280 \text{ kN/m}^2$ ,  $W = 0.015 \text{ m}^3$ . SECCIÓN: 60 x 25 cm.

-Biempotrada:  $M_{F_{max}} = (q \cdot L^2)/12 = 172.92 \text{ kN} \cdot \text{m} < (R_{md})/W$ . Por tanto  $W = 0.010 \text{ m}^3$ . SECCIÓN: 50 x 25 cm.

##### Luz= 15 metros:

-Biarticulada:  $M_{F_{max}} = (q \cdot L^2)/8 = 583.59 \text{ kN} \cdot \text{m} < (R_{md})/W$ . Por tanto,  $W = 0.034 \text{ m}^3$ . SECCIÓN: 90 x 25 cm.

-Biempotrada:  $M_{F_{max}} = (q \cdot L^2)/12 = 389.06 \text{ kN} \cdot \text{m} < (R_{md})/W$ . Por tanto  $W = 0.023 \text{ m}^3$ . SECCIÓN: 75 x 25 cm.

##### Luz= 25 metros:

-Biarticulada:  $M_{F_{max}} = (q \cdot L^2)/8 = 1621.09 \text{ kN} \cdot \text{m} < (R_{md})/W$ . Por tanto,  $W = 0.094 \text{ m}^3$ . SECCIÓN: 150 x 25 cm.

-Biempotrada:  $M_{F_{max}} = (q \cdot L^2)/12 = 1080.72 \text{ kN} \cdot \text{m} < (R_{md})/W$ . Por tanto  $W = 0.063 \text{ m}^3$ . SECCIÓN: 125 x 25 cm.

## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNIONES MECÁNICAS

### 5.1. HIPÓTESIS PARA EL CÁLCULO

Es importante el hecho de que el ancho de la viga está limitado a 25 cm por cuestiones constructivas ya que, aunque la madera sea laminada, las láminas se solapan en longitudinal pero no en transversal (esa técnica sólo se emplea, por lo general, en la fabricación de barcos de gran escala), y no pueden obtenerse láminas de ancho mayor (por diámetro de los troncos de los árboles). Por tanto, se obtienen piezas bastante esbeltas en las que el pandeo puede ser un problema.

PILARES:

##### Luz= 10 metros:

-Biarticulado:  $F_{c_{max}} = (q \cdot L)/2 = 103.75 \text{ kN} < (R_{md}) \cdot \text{Área sección}$ . Siendo  $R_{md} = 17280 \text{ kN/m}^2$ ,  $A = 0.006 \text{ m}^2$ . Con una sección de 8 x 8 cm sería suficiente para aguantar dicha compresión, pero esto no sería realista (pandeo, viento...). Por tanto, emplearemos una SECCIÓN: 25 x 15 cm.

-Biempotrado:  $M_{F_{max}} = 172.92 \text{ kN} \cdot \text{m} < (R_{md})/W$ . Por tanto  $W = 0.010 \text{ m}^3$ . SECCIÓN: 50 x 25 cm, igual que en la viga.

##### Luz= 15 metros:

-Biarticulado:  $F_{c_{max}} = (q \cdot L)/2 = 155.63 \text{ kN} < (R_{md}) \cdot \text{Área sección}$ . Así sería  $A = 0.009 \text{ m}^2$ . Con una sección de 10 x 10 cm sería suficiente, pero de nuevo emplearemos una SECCIÓN: 25 x 15 cm

-Biempotrado:  $M_{F_{max}} = 389.06 \text{ kN} \cdot \text{m} < (R_{md})/W$ . Por tanto  $W = 0.023 \text{ m}^3$ . SECCIÓN: 75 x 25 cm, igual que en la viga.

##### Luz= 25 metros:

-Biarticulado:  $F_{c_{max}} = (q \cdot L)/2 = 259.37 \text{ kN} < (R_{md}) \cdot \text{Área sección}$ . Por tanto,  $A = 0.015 \text{ m}^2$ . Con una sección de 10 x 15 cm sería suficiente, pero de nuevo emplearemos una SECCIÓN: 25 x 15 cm

-Biempotrado:  $M_{F_{max}} = 1080.72 \text{ kN} \cdot \text{m} < (R_{md})/W$ . Por tanto  $W = 0.063 \text{ m}^3$ . SECCIÓN: 125 x 25 cm, como en la viga.

Existen casos en los que, por la solución de la unión, el pilar y la viga deben tener el mismo canto, por lo que se realizará así a pesar de estar sobredimensionado dicho pilar.

#### e) Uniones utilizadas y elementos correspondientes:

El análisis se centra en la influencia que la unión puede tener en el comportamiento de la estructura y los esfuerzos a los que se ve sometida, así como a las posibles problemáticas derivadas de esfuerzos perpendiculares a la fibra.

En este aspecto es totalmente determinante la rigidez del nudo: como se ha visto en el dimensionado manual, el momento flector es bastante más alto en las vigas articuladas que en las empotradas. Así, se han elegido 6 tipos de uniones viga-pilar y 3 uniones pilar-cimentación, con distintos grados de articulación o empotramiento, para comparar sus resultados.

Las uniones elegidas para el cálculo son (haciendo referencia a sus códigos en la base de datos):

PÓRTICO 1: N1A01 (pilar-cimentación articulada en pasador) + N2A01 (viga-pilar articulados en pasador).

PÓRTICO 2: N1R02 (pilar-cimentación articulado con herraje) + N2A03 (viga-pilar articulados con herraje).

PÓRTICO 3: N1R02 (pilar-cimentación articulado con herraje) + N2A05 (viga-pilar articulados mediante solape y clavijas).

PÓRTICO 4: N1R02 (pilar-cimentación empotrado con herraje) + N2R03 (viga-pilar rígido con herraje).

PÓRTICO 5: N1R02 (pilar-cimentación empotrado con herraje) + N2R04 (viga-pilar rígida mediante unión encolada).

PÓRTICO 6: N1R02 (pilar-cimentación empotrado con herraje) + N2R01 (viga-pilar rígida mediante solape y corona de pernos).

Los herrajes empleados son de 6 mm para placas y 20 mm para pletinas y orejetas en pasador (menor punto de apoyo, más rigidez necesaria) y de acero S275 según catálogo consultado. Las clavijas son pernos M10 (10 mm de diámetro) y de acero clase 8.8.

## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNIONES MECÁNICAS

### 5.1. HIPÓTESIS PARA EL CÁLCULO

**Material Property Data**

General Data

Material Name and Display Color: Herraje S275

Material Type: Steel

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 76.9729

Mass per Unit Volume: 7.849

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 1.999E+08

Poisson's Ratio, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 76903069

Other Properties for Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 275000

Minimum Tensile Stress, Fu: 430000

Effective Yield Stress, Fye: 275000

Effective Tensile Stress, Fue: 430000

**Material Property Data**

General Data

Material Name and Display Color: Perno Acero 8.8

Material Type: Steel

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 76.9729

Mass per Unit Volume: 7.849

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 640000

Poisson's Ratio, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.080E-05

Shear Modulus, G: 246153.85

Other Properties for Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 670000

Minimum Tensile Stress, Fu: 800000

Effective Yield Stress, Fye: 670000

Effective Tensile Stress, Fue: 800000

I. 29. Datos introducidos en SAP2000 para el material de los herrajes

I. 30. Datos introducidos en SAP2000 para el material de los pernos

Se ha llevado a cabo el cálculo de 6 pórticos distintos, definidos previamente en el apartado anterior, para tres casos distintos (luces de 10, 15 y 25 metros). Con este procedimiento se pretende encontrar ciertos patrones de comportamiento comunes en las uniones, así como las diferencias entre ellas que pueden hacerlas más o menos viables para unas luces determinadas u otras.

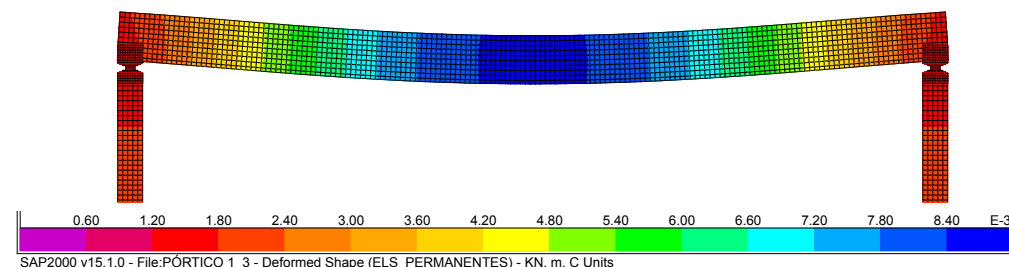
En este apartado únicamente se van a comentar los datos llamativos o interesantes a efectos de dicho análisis. En el Anexo 4 aparecen todos los diagramas obtenidos para realizar dicho análisis, de los cuales irán apareciendo los más representativos a lo largo de la explicación. Las comprobaciones que se han seguido para comparar las distintas situaciones son: deformaciones (ELS), tensiones axiales en vigas ( $S_{11}$ ), tensiones perpendiculares a la fibra en vigas ( $S_{22}$ ), y de igual forma en pilares (en los cuales la tensión axial es  $S_{22}$ ). Para que los diagramas sirvan para realizar comparaciones a simple vista, estos valores se han limitado por las resistencias de cálculo a compresión y tracción de la madera ( $f_{cd}$  y  $f_{td}$  tomando sus valores en paralelo o en perpendicular a la fibra, según corresponda).

Dichos valores, debido a las inexactitudes del cálculo (inexistencia de rozamiento entre piezas, sino únicamente transmisión de esfuerzos a través de los pernos) no sirven tanto para comprobar si las uniones cumplen perfectamente el ELU según normativa, sino más bien para tener una noción de en qué uniones se generan más esfuerzos perpendiculares a la fibra, cuáles optimizan más la transmisión de esfuerzos sin penalizar las piezas de madera... Por lo que se prestará más atención al orden de magnitud de los valores y a la distribución de los esfuerzos, más que a sus números exactos.

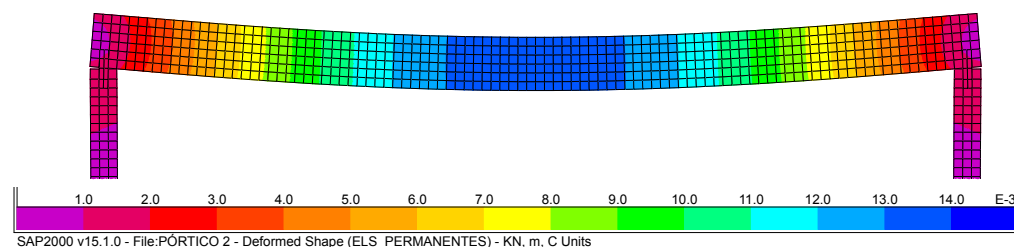
A continuación se añaden las conclusiones más significativas para los pórticos articulados, señalando las similitudes y diferencias generadas por las tres soluciones escogidas. Posteriormente se realiza el mismo procedimiento con los tres pórticos de uniones rígidas. Por último, en el apartado de conclusiones, se aportarán las reflexiones que conciernen a las diferencias entre ellos y su posible aplicación en el diseño de estructuras y sus uniones.

## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNIONES MECÁNICAS

### 5.2. ANÁLISIS DE NUDOS ARTICULADOS

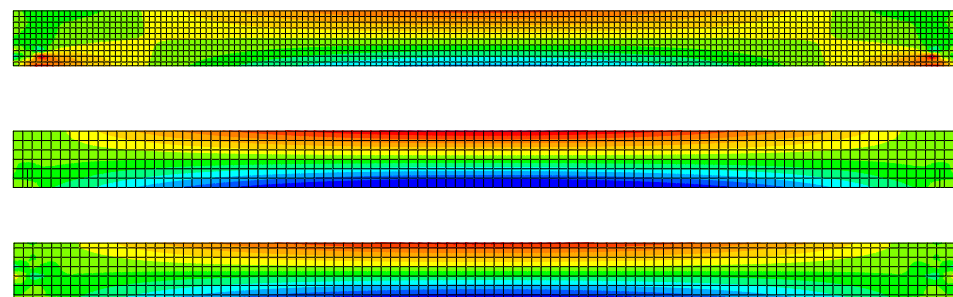


I. 31. Deformaciones pórtico 1 (articulación orejeta en pasador) para L=10 m



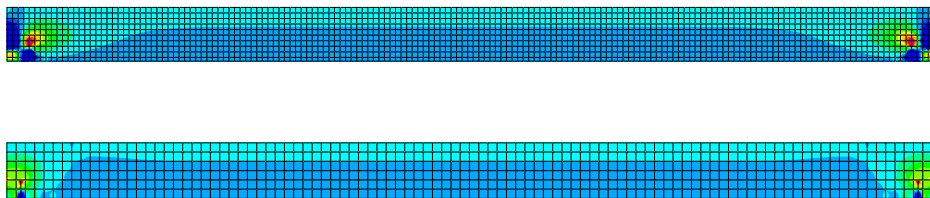
I. 32. Deformaciones pórtico 2 (articulación herraje y fila de pernos) para L=10 m

Como vemos, debido a que la primera solución de nudo tiene una superficie mayor de fijación con la viga que la segunda, es algo más rígida y, por tanto, sus deformaciones son prácticamente de la mitad. Así, la unión cuyo comportamiento es más similar a una articulación “pura” es la usada en el pórtico 2. Esto, lógicamente, se traduce a un momento flector mayor en el segundo caso, por lo que las tracciones y compresiones serán mayores. La solución del pórtico 3 es un caso intermedio entre ellos.



I. 33. Diagrama de esfuerzos axiales ( $S_{11}$ ) en la viga del pórtico 1, 2 y 3 (por orden descendente), todos ellos limitados por los mismos valores (resistencias de cálculo), para L=10 m

En cuanto a los esfuerzos perpendiculares a la fibra de la madera, se concentran lógicamente en los puntos de contacto de la madera con las clavijas. En los dos últimos pórticos son similares y afectan a una superficie muy reducida, mientras que en el primer pórtico se genera una zona de tracción perpendicular a la fibra en las esquinas superiores de la viga, debido a que la propia geometría de la unión se opone al giro de los extremos de la viga. Es muy importante tener en cuenta este tipo de comportamientos, que pueden dar lugar a rotura de la madera por su reducida resistencia a tracción perpendicular (apenas  $0.29 \text{ kN/m}^2$ ).



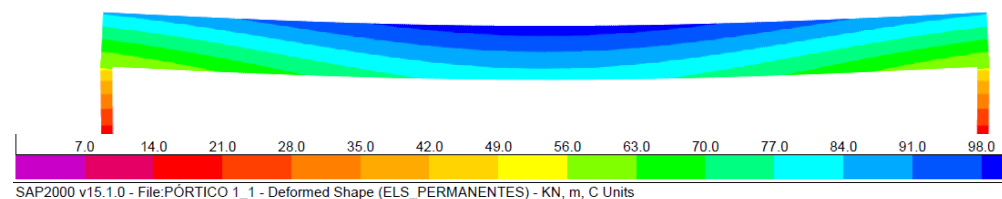
I. 34. Diagrama de esfuerzos perpendiculares a la fibra ( $S_{22}$ ) en la viga del pórtico 1 y 2 (por orden descendente), todos ellos limitados por los mismos valores (resistencias de cálculo), para  $L=10 \text{ m}$

A medida que se aumenta la luz de los pórticos, y consecuentemente su canto (según calculado en el dimensionado manual), van aumentando en escala las deformaciones y los esfuerzos axiales, a pesar de que el canto ya es considerable ( $90 \text{ cm}$  para  $L=15 \text{ m}$  y  $150 \text{ cm}$  para  $L=25 \text{ m}$ ). En el caso del pórtico 1, al quedar ya las dimensiones del herraje en un segundo plano frente a su gran canto, se comporta más como articulación que en la primera situación analizada.

Así vemos que, a pesar de que las secciones estaban calculadas manualmente para el cumplimiento de ELU, en la realidad el momento flector es mayor al obtenido según prontuario, y habría que darle a las vigas articuladas una sección aún mayor.

## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNIONES MECÁNICAS

### 5.2. ANÁLISIS DE NUDOS ARTICULADOS

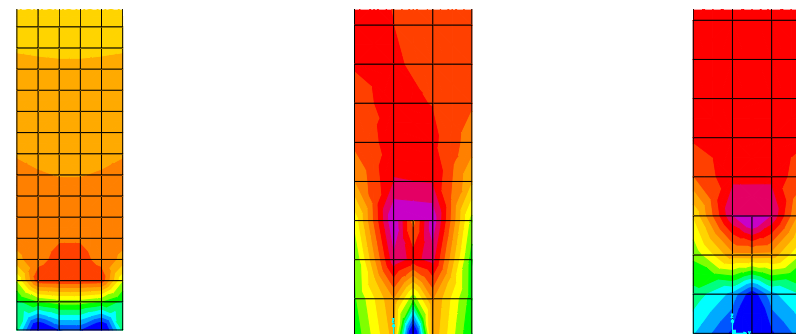


I. 35. Deformaciones pórtico 1 (articulación orejeta en pasador) para  $L=25 \text{ m}$

Las dos uniones articuladas pilar-cimentación también tienen comportamientos diferentes en ciertos aspectos, debido fundamentalmente al modo en el que se fijan a la madera, lo cual genera esfuerzos distintos.

Es muy representativo el hecho de que no sólo la solución del nudo determina los esfuerzos en la base del pilar, sino que también influye la unión existente entre viga y pilar, ya que cuanto más rígida sea, más momento se transmitirá al pilar y este, al intentar girar y verse impedido por los pernos, genera compresiones y tracciones fuertes localizadas en esa zona. Esto se ve especialmente bien entre las dos imágenes abajo a la derecha, ambas pertenecientes a la misma solución de nudo pero en distintos pórticos.

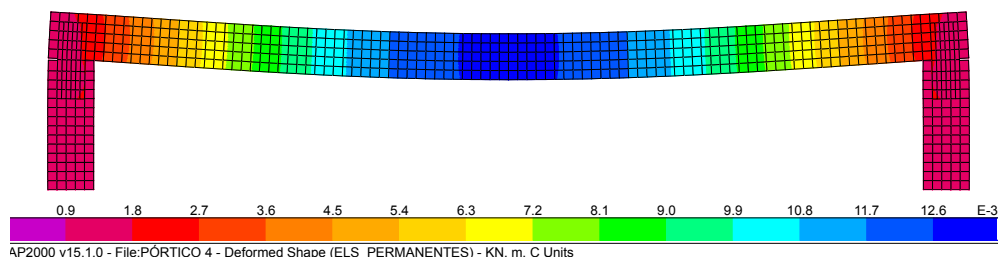
En el segundo pórtico, como entre pilar y viga no se transmite prácticamente flector (como se ha visto antes), no se producen apenas tracciones en el extremo, por estar comprimido. En el tercer caso, sin embargo, se genera una gran zona de tracciones al intentar girar pero estar fijado en esos puntos.



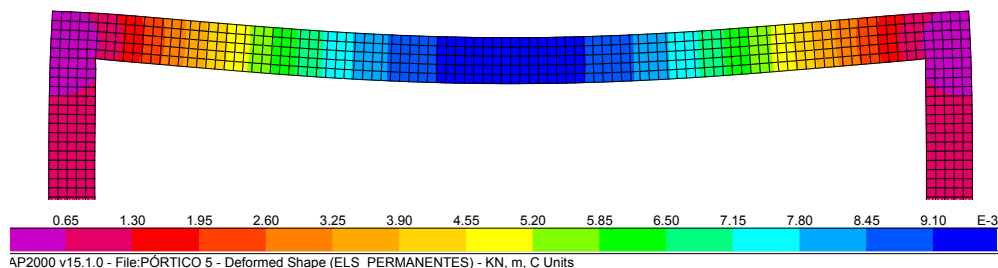
I. 36. Esfuerzos axiales en base de pilar ( $S_{22}$ ) para los pórticos 1, 2 y 3, con  $L=10 \text{ m}$ .

En lo referido a nudos rígidos, además de dos uniones mecánicas (una mediante herraje y otra mediante corona de pernos), se ha analizado el funcionamiento de un supuesto pórtico con unión macrodentada entre viga y pilar, en ángulo, para conseguir una única pieza continua. Se pretenden comparar los resultados de las uniones mecánicas con una solución mucho más rígida, para analizar los posibles pros y contras que suponen.

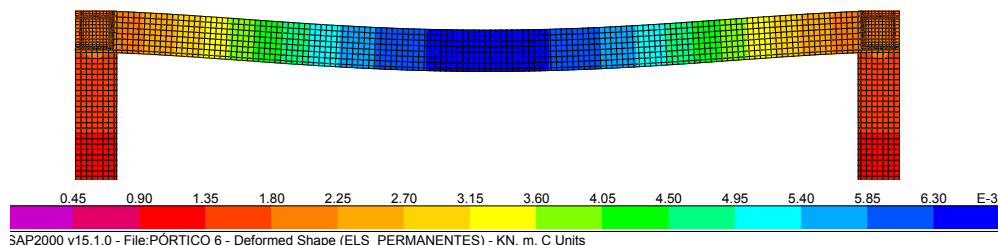
La solución menos rígida en este caso es la de herrajes fijados con pernos, lo cual no es del todo realista: si se tuviera en cuenta el rozamiento entre la madera y los herrajes, se conseguiría que trabajaran solidariamente.



I. 37. Deformaciones pórtico 4 (rígido mediante herrajes) para L=10 m



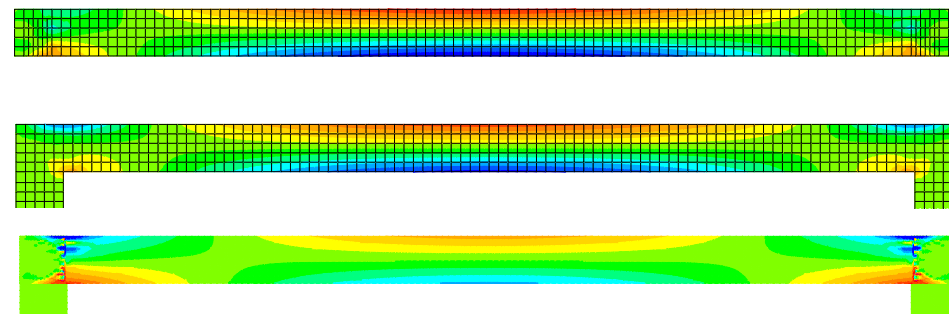
I. 38. Deformaciones pórtico 5 (nudo rígido mediante macrodentado encolado) para L=10 m



I. 39. Deformaciones pórtico 5 (nudo rígido mediante corona de pernos) para L=10 m

## 5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNIONES MECÁNICAS

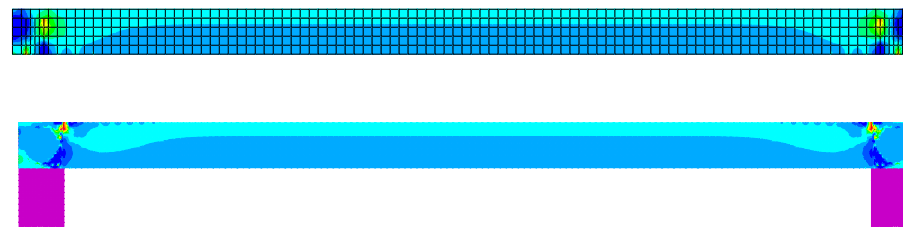
### 5.3. ANÁLISIS DE NUDOS RÍGIDOS



I. 40. Diagramas de esfuerzos axiales ( $S_{11}$ ) en la viga del pórtico 4, 5 y 6 (por orden descendente), todos ellos limitados por los mismos valores (resistencias de cálculo), para L=10 m

Sin embargo, tanto las soluciones de nudo rígido encolado como la de corona de pernos obtienen deformaciones muy reducidas, tanto en pilares como en la viga.

Al contrario de lo que ocurría anteriormente, al ser la solución del pórtico 4 menos rígida que las demás, presenta mayor concentración de tracciones y compresiones axiales, al contrario que en los otros dos casos. Sin embargo, aunque la solución de corona de pernos genera menores deformaciones, aparecen tracciones y compresiones bastante altas en puntos críticos de la viga que podrían llevar a la rotura, por lo que hay que tener muy en cuenta la distancia entre los pernos y el borde de las piezas de madera para evitar dicha rotura. Esto también ocurre con los esfuerzos perpendiculares a la fibra, ya que se genera un semicírculo de tracciones en torno a los pernos que podrían quebrar la viga en la zona de la unión.

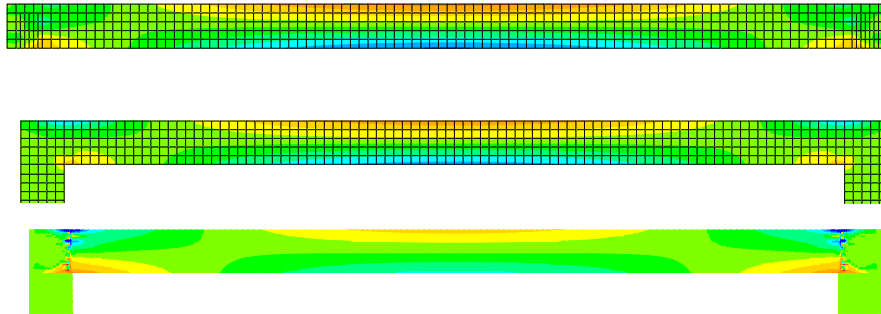


I. 41. Diagrama de esfuerzos perpendiculares a la fibra ( $S_{22}$ ) en la viga del pórtico 4 y 6 (por orden descendente), todos ellos limitados por los mismos valores (resistencias de cálculo), para L=10 m

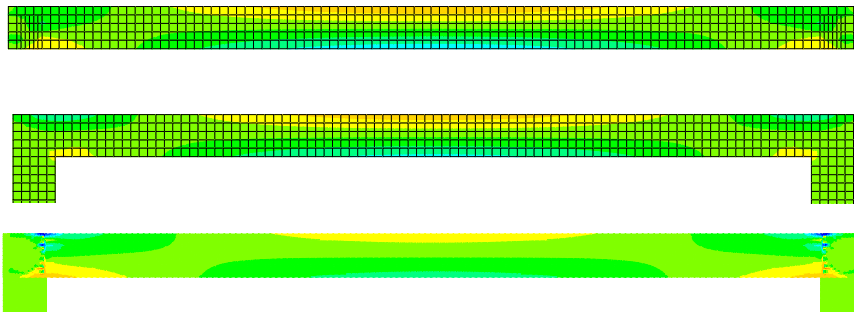


Sin embargo, cuando se aumenta la luz de la estructura, y consecuentemente el canto de la misma, no se produce un aumento de los esfuerzos o de la zona afectada por ellos, y el aumento en los valores de las deformaciones es muy pequeño.

Es más, las tracciones y compresiones axiales se reducen conforme aumenta la luz y sus dimensiones, lo que posibilitaría la optimización de dichos pórticos, por medio de un canto más reducido (ya que tampoco se llega a acercarse al ELS). Es decir, estas uniones se optimizan más cuando las luces son mayores.



I. 42. Diagramas de esfuerzos axiales ( $S_{11}$ ) en la viga del pórtico 4, 5 y 6 (por orden descendente), todos ellos limitados por los mismos valores (resistencias de cálculo), para  $L=15$  m



I. 43. Diagramas de esfuerzos axiales ( $S_{11}$ ) en la viga del pórtico 4, 5 y 6 (por orden descendente), todos ellos limitados por los mismos valores (resistencias de cálculo), para  $L=25$  m

Como resumen del análisis llevado a cabo, se puede decir que existe una relación directa entre la rigidez de la unión, los esfuerzos que soportan los elementos unidos y sus deformaciones, refiriéndonos al caso de un pórtico sometido a cargas verticales. El problema surge cuando la línea entre nudo rígido y articulado se diluye, debido a que un simple cambio de dimensiones o varias fijaciones más pueden cambiar completamente el funcionamiento de la unión.

En lo referido al caso concreto de una viga sometida a cargas verticales y fijada a los soportes con las soluciones vistas previamente, la elección entre una unión articulada o rígida va a determinar en gran medida las dimensiones de dicha viga: si es articulada, cuando mayor sea la luz, mayor tendrá que ser el aumento de sección para no sobrepasar el ELU. Sin embargo, la ventaja de este tipo de nudo es que el pilar puede ser muy esbelto (siempre teniendo en cuenta la existencia de arriostramiento frente a viento), ya que únicamente debe aguantar la compresión transmitida por la viga.

No obstante, empleando uniones rígidas entre pilares y vigas puede conseguirse una reducción de la sección de la viga, que será mayor si el pórtico tiene grandes luces, pero que por contra requiere también una mayor dimensión de pilares.

Finalmente, la decisión será específica para cada proyecto: dependiendo de las cargas, de la posibilidad o no de implementar sistemas de arriostramiento, de la presencia que se quiera obtener con la estructura en el edificio... se elegirá una opción u otra. Como se ha visto en la base de datos, las soluciones son muy diversas y pueden diseñarse versiones de uniones existentes para solucionar casos concretos que difieran de los "estándares".

Sin embargo, sí que es necesario tener en cuenta todas las cuestiones constructivas que se mencionaron al inicio del estudio. Si diseñamos un nudo muy rígido, para conseguir una optimización del pórtico, pero el ambiente en el que se encuentra la estructura presenta cambios significativos de humedad, lo que provocará la hinchazón y merma de la madera, finalmente las piezas acabarán por romperse debido a la coacción del movimiento.

## 6. RESULTADOS GLOBALES DEL ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Asimismo, si la viga está articulada sobre el pilar pero es excesivamente esbelta y no tiene superficie de apoyo suficiente, podrían producirse inestabilidades, pandeo o incluso vuelco de la misma, sobre todo ante cargas no previstas (sismo). Por ello, a pesar de que lo ideal para una unión articulada sería que la superficie de conexión sea la mínima, para no limitar su giro, en la práctica es muy complicado llevar a cabo una unión de ese tipo, por los peligros que podría causar.

La correcta resolución de nudos en estructuras de madera es un ámbito tremendamente amplio y complejo, en el que se está avanzando mucho desde la incorporación de elementos metálicos en las mismas. Sin embargo, aún existen infinidad de soluciones en las que indagar, incluso podrían extrapolarse de otras tipologías estructurales, como ocurre ya con algunas uniones, que se adaptan a partir de soluciones para estructuras de acero. Desde este ámbito puede estudiarse e investigarse bastante acerca de las rigideces, la mejor transmisión de los esfuerzos, la mejora de las propiedades de la madera en las direcciones perpendiculares a las fibras, etc.

## 7. POSIBLES VÍAS DE INVESTIGACIÓN POSTERIORES

Debido a la gran amplitud del ámbito de las uniones en las estructuras de madera laminada, por la cantidad de soluciones y la dependencia de su funcionamiento en función de las dimensiones de la estructura, sus cargas, el ambiente en el que se encuentra, etc, quedan muchas futuras vías de investigación a partir de este trabajo.

Una de ellas sería el análisis en mayor profundidad de las uniones entre soporte y cimentación, observando su funcionamiento frente a esfuerzos horizontales (viento) en lugar de únicamente frente a axiles.

Otra sería el estudio de otros tipos de uniones, no únicamente en pórticos como se ha analizado en este caso (por ser la tipología más estandarizada), sino entre correas y vigas o entre partes de una cercha, aspecto que sería de gran interés por la aparición de nuevos sistemas que suelen emplearse en ellos (placas-clavo, uniones de composite...).

Por último, para realizar un análisis más exhaustivo de todas estas uniones y de las calculadas en el estudio, deberían llevarse a cabo con un programa de elementos finitos en el cual se tenga en cuenta el rozamiento entre elementos (madera y placas/conectores), no transmitiendo únicamente los esfuerzos a través de los pernos y dejando cierta distancia entre ellos, como se ha realizado en este análisis (por requerirse unos conocimientos técnicos y una extensión de tiempo de la que no se dispone actualmente).

Por medio de ese cálculo, podría afinarse mucho más en la comprobación de tensiones perpendiculares a la fibra de la madera, que seguramente serán mucho menores al tener en cuenta el factor de contacto entre elementos (ya que los esfuerzos se distribuyen entre una mayor superficie, en lugar de en elementos puntuales). También podrían analizarse así las uniones de barras encoladas, en las que dicho contacto es el único medio de transmisión de los esfuerzos.



-APA, The Engineered Wood Association. Technical Note: Glulam connection details. 2007. APA.

-Argüelles, Ramón / Arriaga, Francisco. Estructuras de madera: Diseño y cálculo. 1996. AITIM (Asociación de Investigación Técnica de la Industria de la Madera).

-Arriaga Martitegui, F / Iñiguez González, G. / Esteban Herrero, M. / Argüelles Álvarez, R. / Fernández Cabo, J.L. Guía de la madera. 2013. Confemadera Hábitat.

-Arriaga Martitegui, F. Uniones con barras encoladas en sistemas estructurales de celosías (Proyecto Carpenton). 2003. AITIM.

-Barrera, Jorge A. La madera laminada: una alternativa estructural y ambiental. Revista M&M Edición 70.

-Barrera, Jorge A. Miya daiku y Suziya daiku: precisión y belleza en los detalles. Revista M&M Edición 88.

-Binsheng, Zhang / McKenzie, William M.C. Design of structural timber to Eurocode 5. 2007. Palgrave Macmillan.

-Canadian Wood Council. Wood reference handbook. 2000. Canadian Wood Council.

-García Badell Lapetra, J. Javier / García Badell Dufour, Hugo. Estructuras de madera informatizadas: Eurocódigo 5 – ENV1995 versión 2004. Belisco ediciones técnicas y científicas.

-González Fuego J.L. / Cabezas Flores, J.A. / Rubio Cavero, M.P. / Domínguez Lorenzo, M. Reducción de tensiones en apoyos entallados de vigas de madera mediante empleo de pernos. 2009. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 13, N°1.

-Jodidio, Phillip. Architecture now: Wood. 2011. Taschen.

-Opderbecke, Adolf. Das Holzbau-Buch für den Schulgebrauch und die Baupraxis. 1909. Verlag Th. Schäfer.

-Rodríguez Nevado, Miguel Ángel. Diseño estructural en madera. 1999. AITIM.

-Smith, Ian / Asiz, Andi / Snow, Monica. Design method for connections in engineered wood structures. 2006. Value to Wood Program, Natural Resources Canada.

-Structural Timber Association. Glued laminated timber structures. Part 2: construction and connection details. 2014. Engineering Bulletin N°9.

-Valero, Ramón. Uniones metálicas en estructuras de madera: manual técnico. 2004. T&T Aginco.

-IMAGEN 1, 2 Y 3: *Opderbecke, Adolf. Das Holzbau-Buch für den Schulgebrauch und die Baupraxis. 1909. Verlag Th. Schäfer.*

-IMAGEN 4, 6, 7, 11 Y 13: *Argüelles, Ramón / Arriaga, Francisco. Estructuras de madera: Diseño y cálculo. 1996. AITIM (Asociación de Investigación Técnica de la Industria de la Madera).*

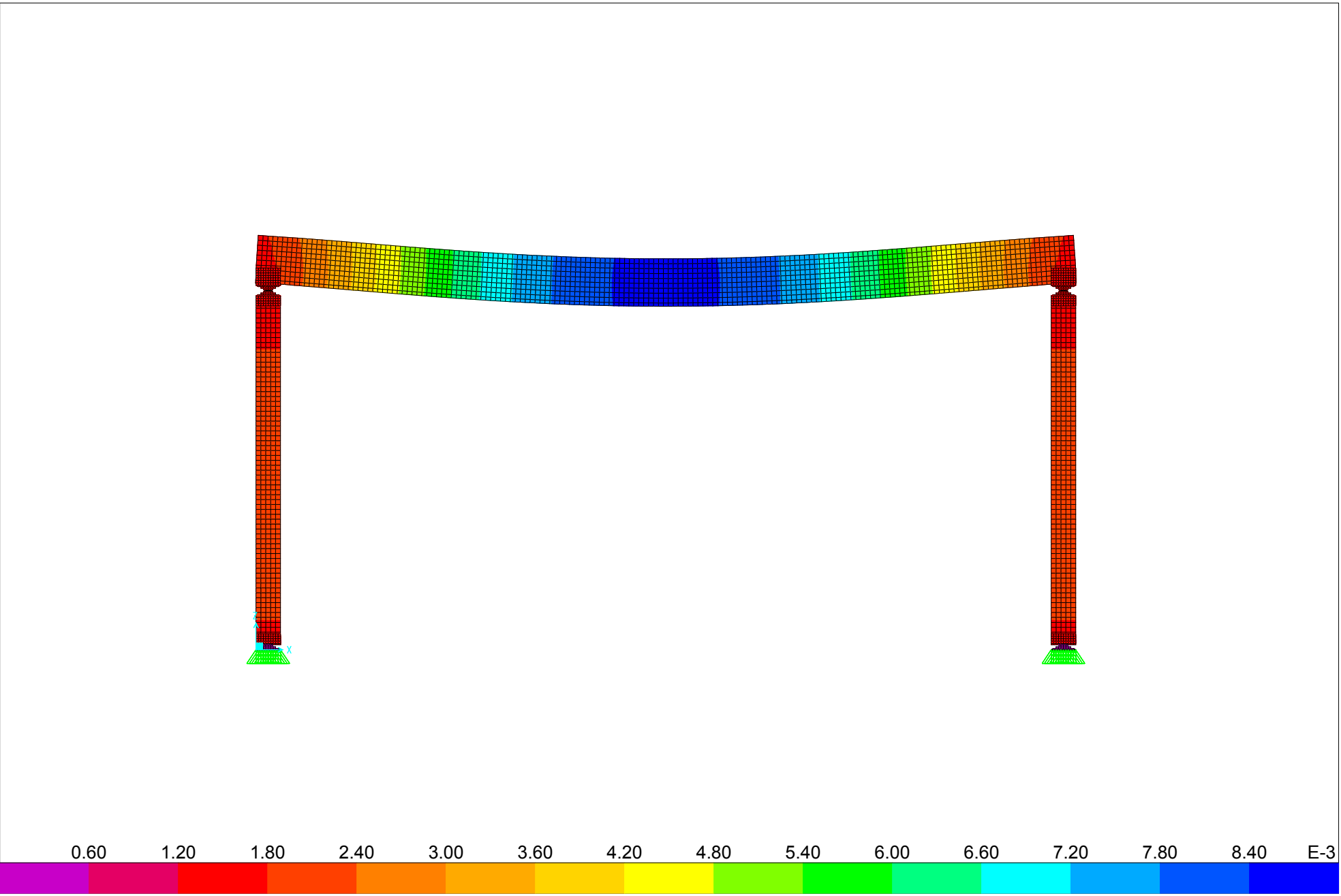
-IMAGEN 5, 8, 9 Y 10: *Canadian Wood Council. Wood reference handbook. 2000. Canadian Wood Council.*

-IMAGEN 12: *APA, The Engineered Wood Association. Technical Note: Glulam connection details. 2007. APA.*

-IMAGEN 14: *Arriaga Martitegui, F / Íñiguez González, G. / Esteban Herro, M. / Argüelles Álvarez, R. / Fernández Cabo, J.L. Guía de la madera. 2013. Confemadera Hábitat.*

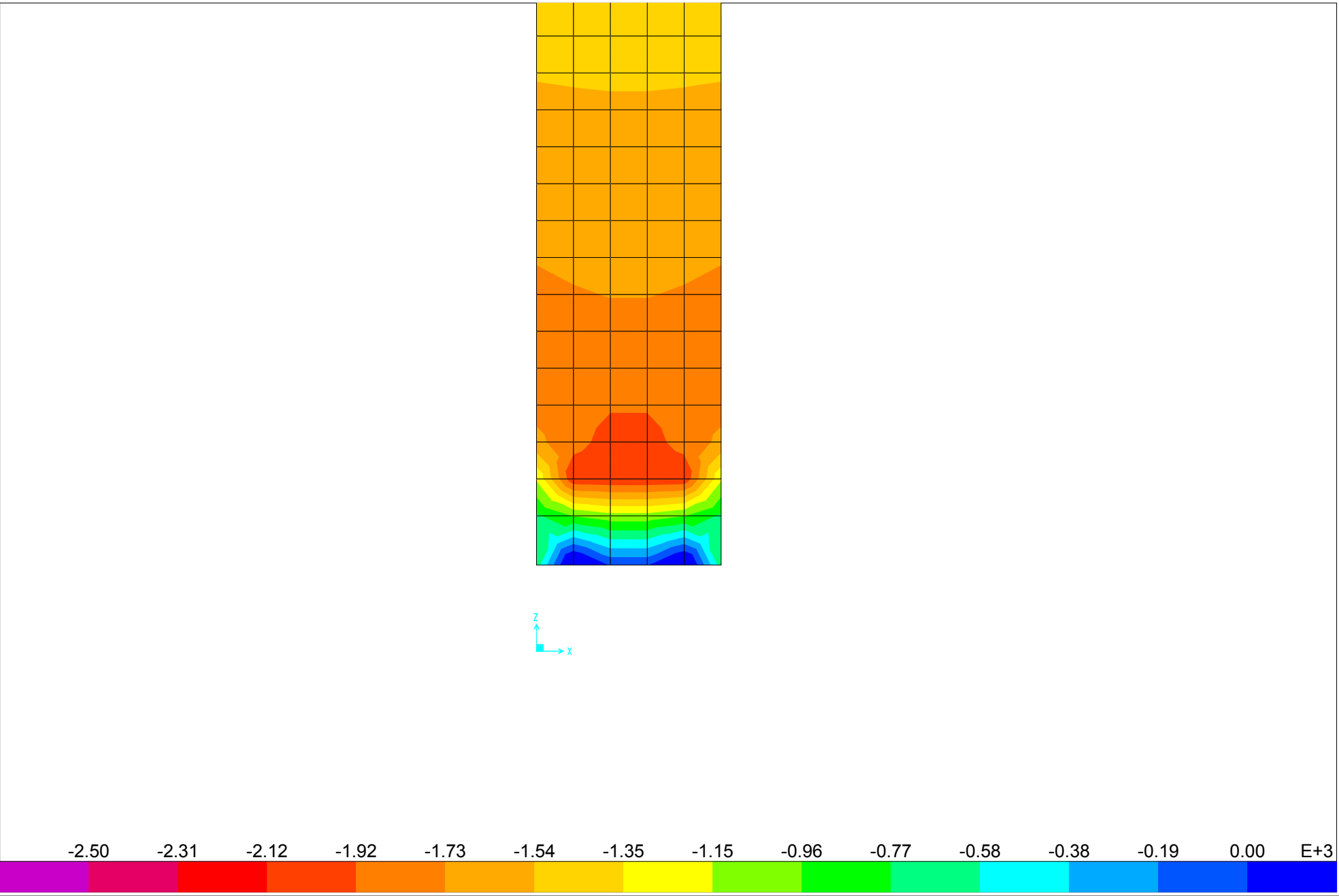
-TABLA 2: *Código Técnico de la Edificación, Documento Básico, Seguridad Estructural - Madera.*

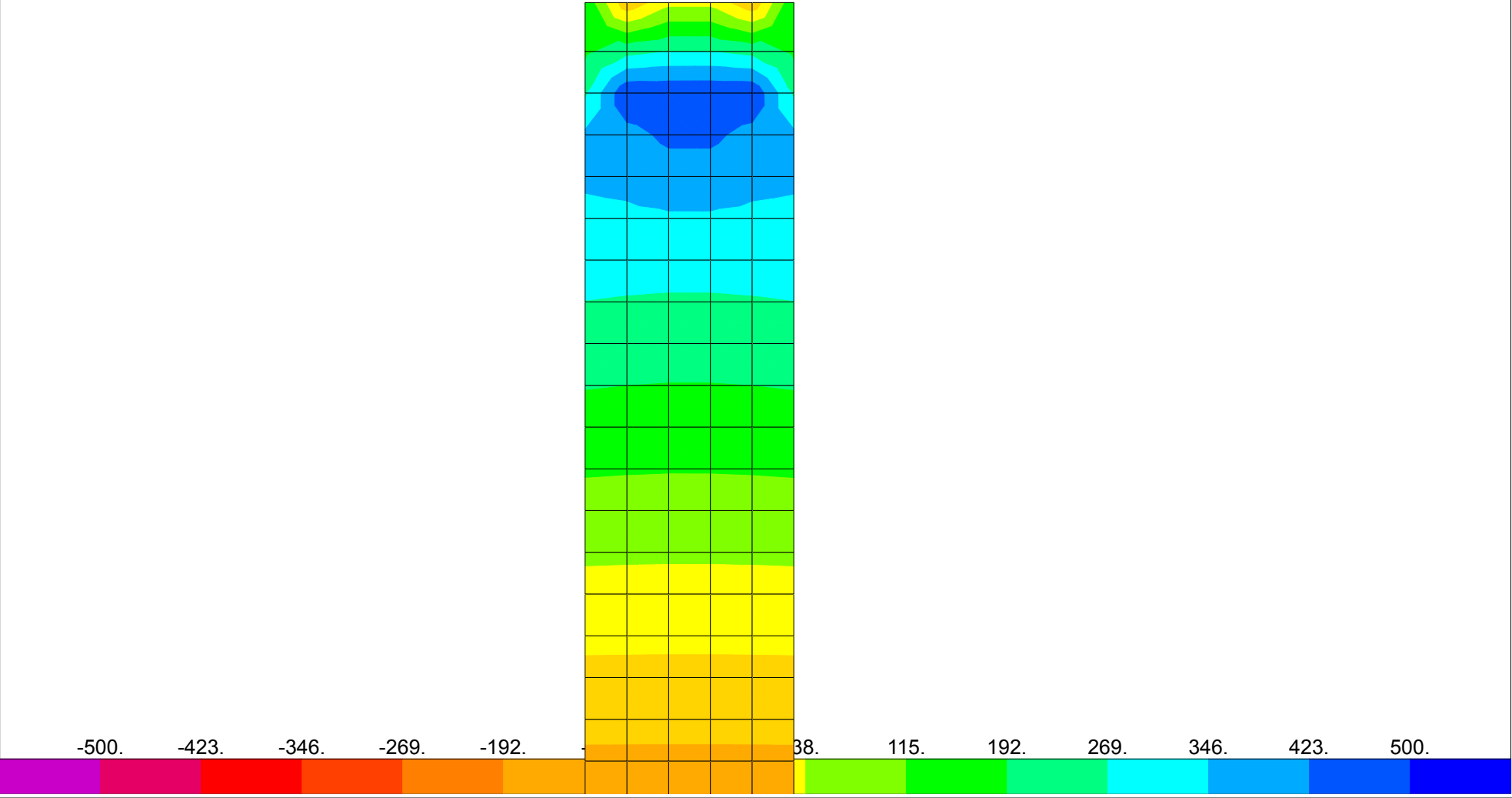
El resto de documentación gráfica (excepto fotografías) es de elaboración propia.

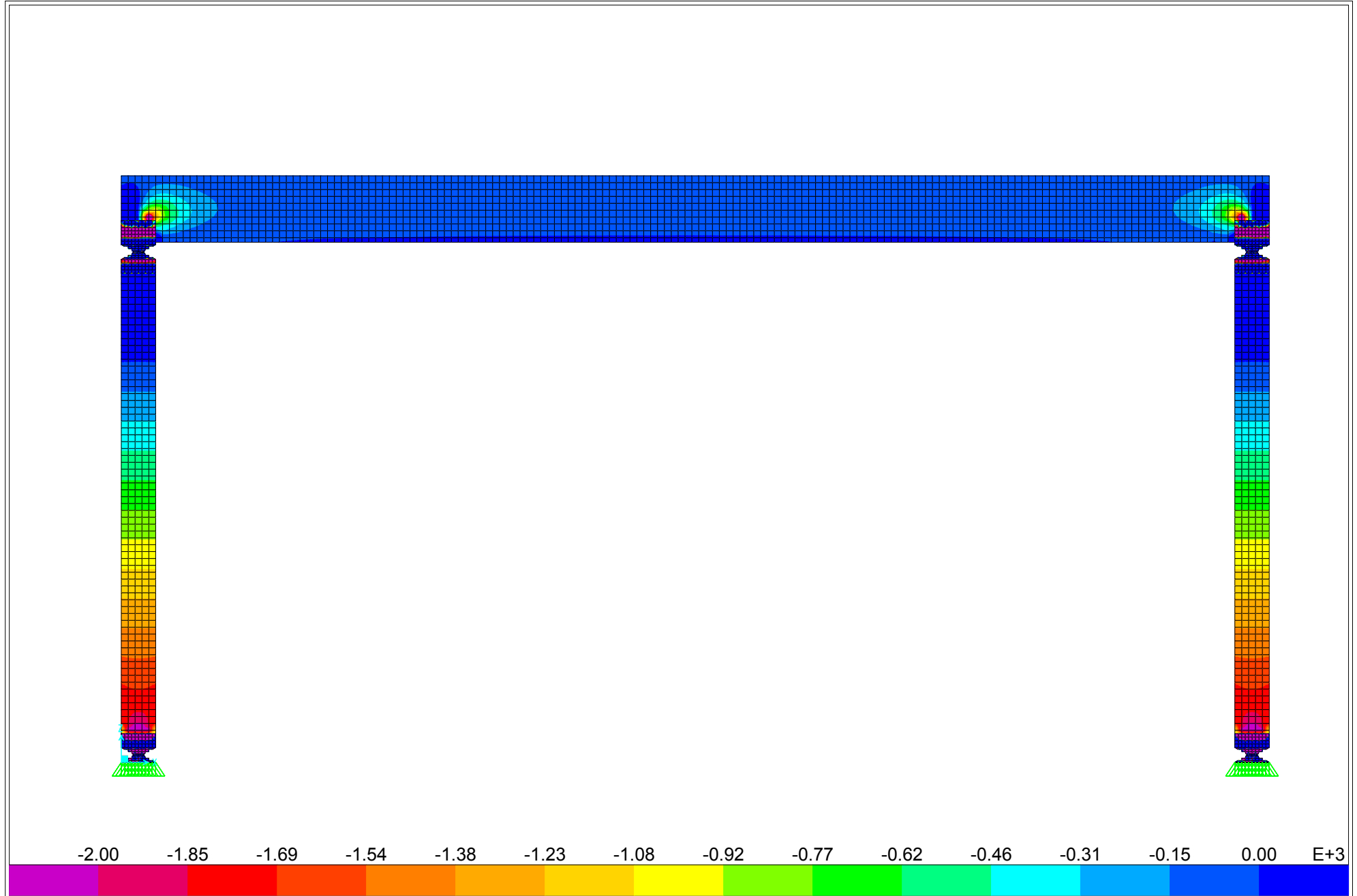


SAP2000 v15.1.0 - File:PÓRTICO 1\_3 - Deformed Shape (ELS\_PERMANENTES) - KN, m, C Units

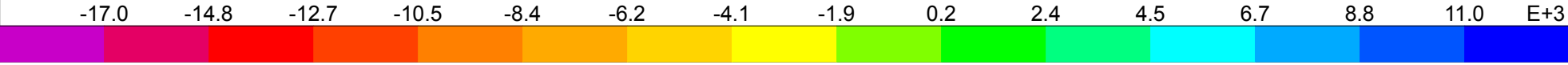
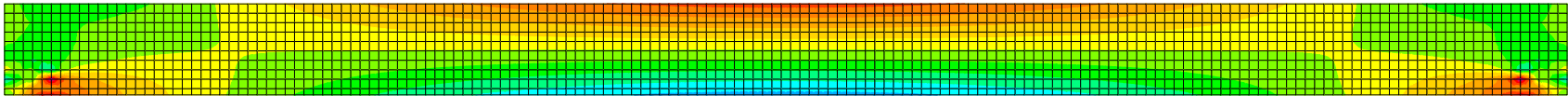
LUZ = 10 METROS

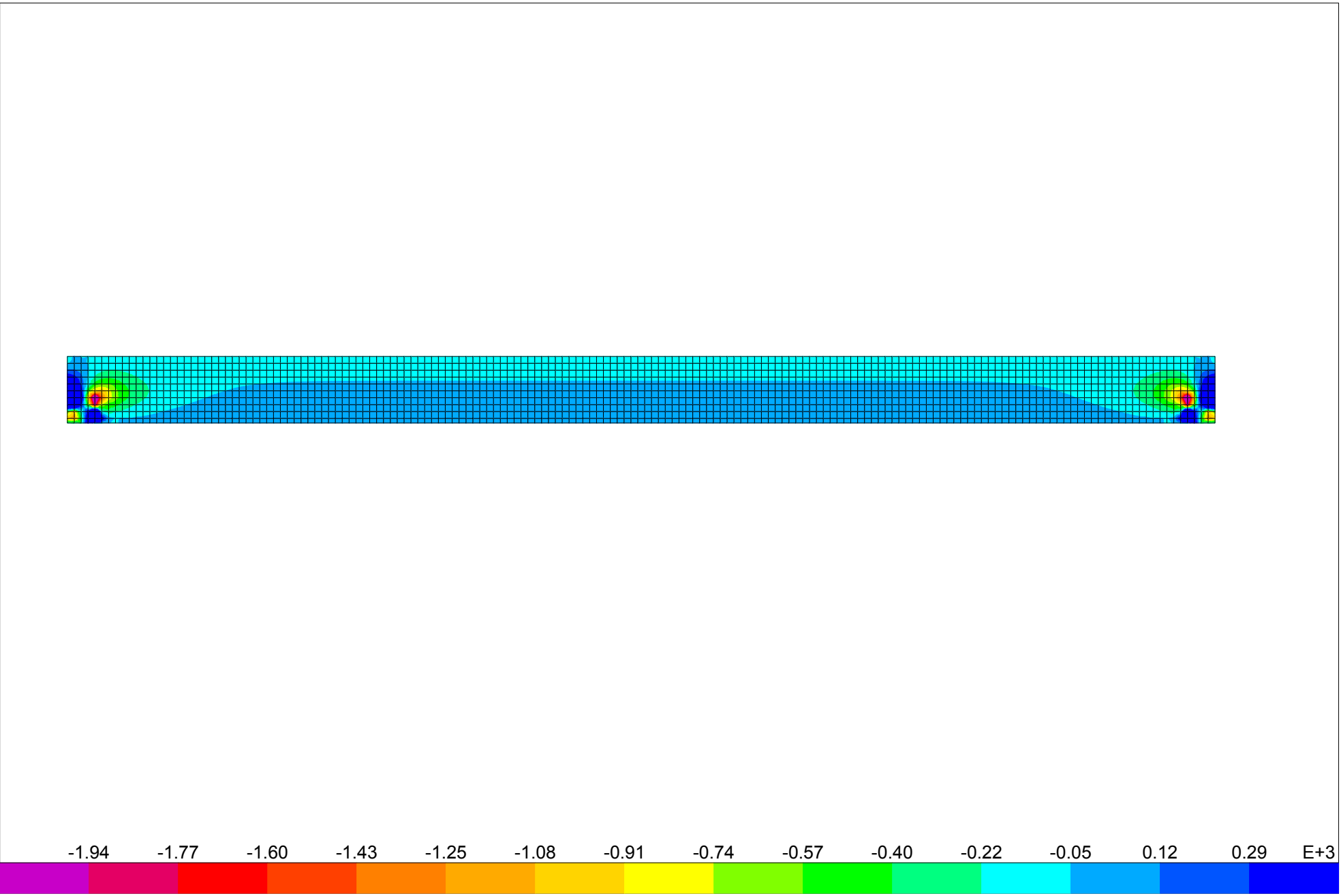


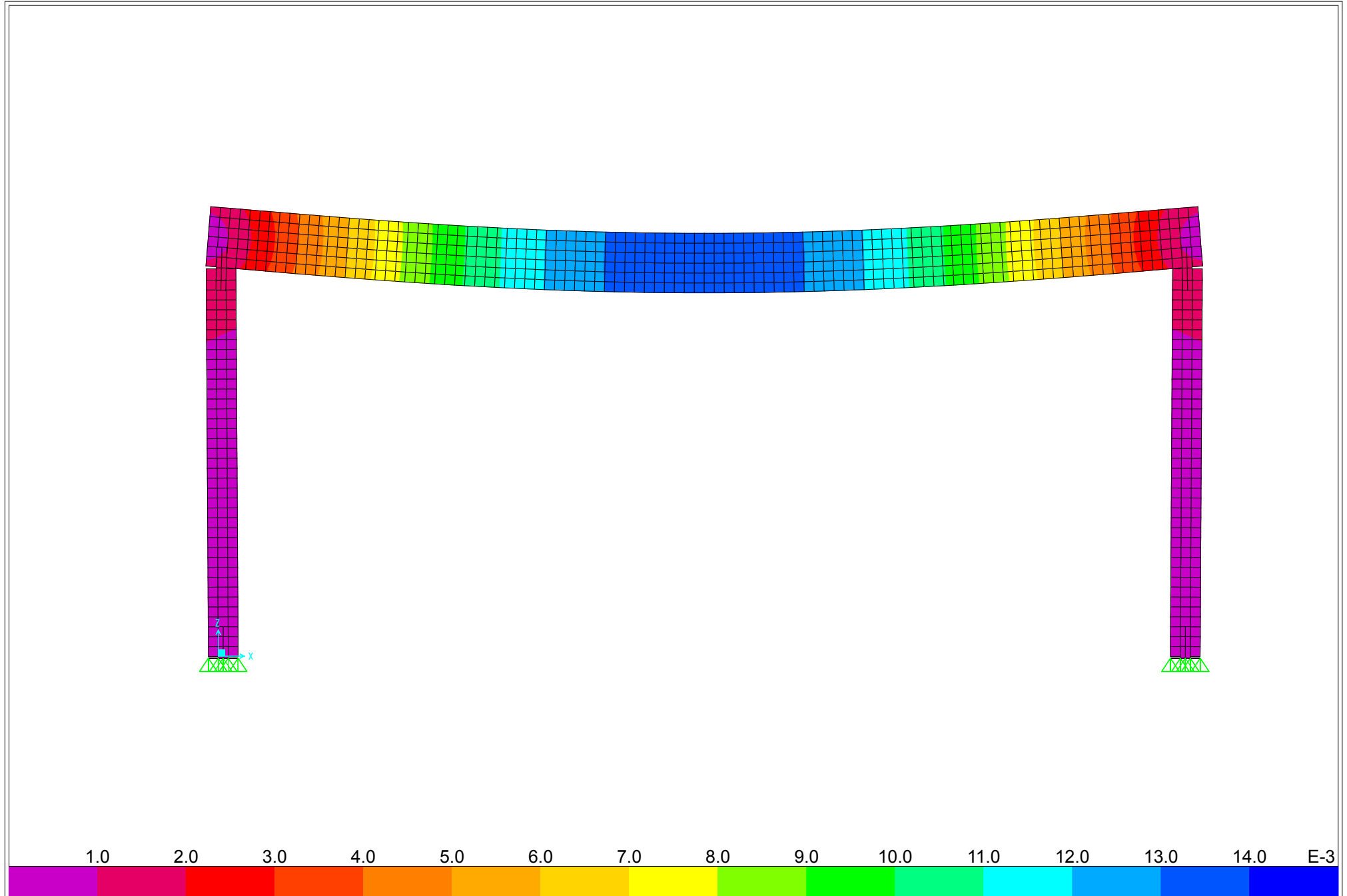


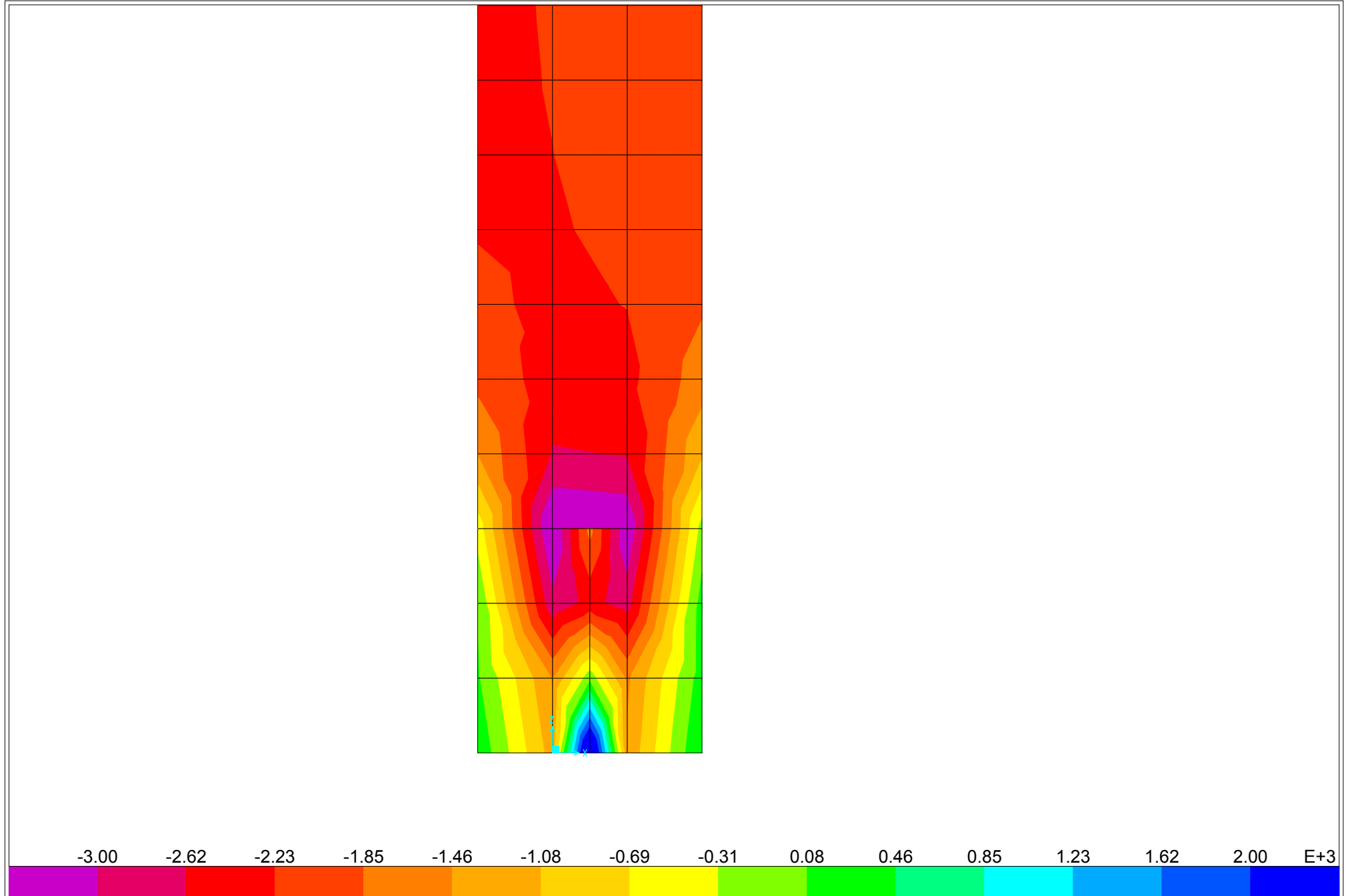


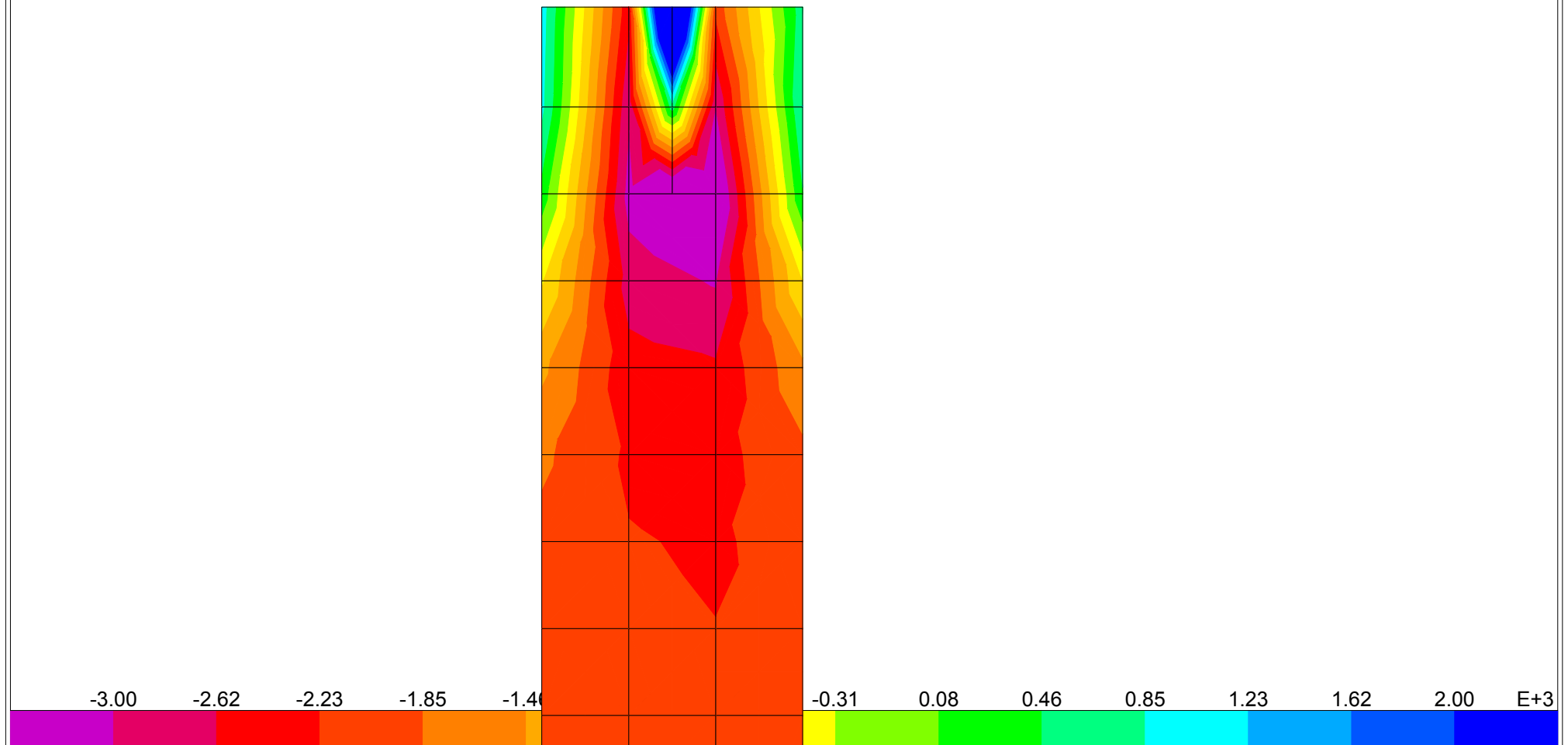




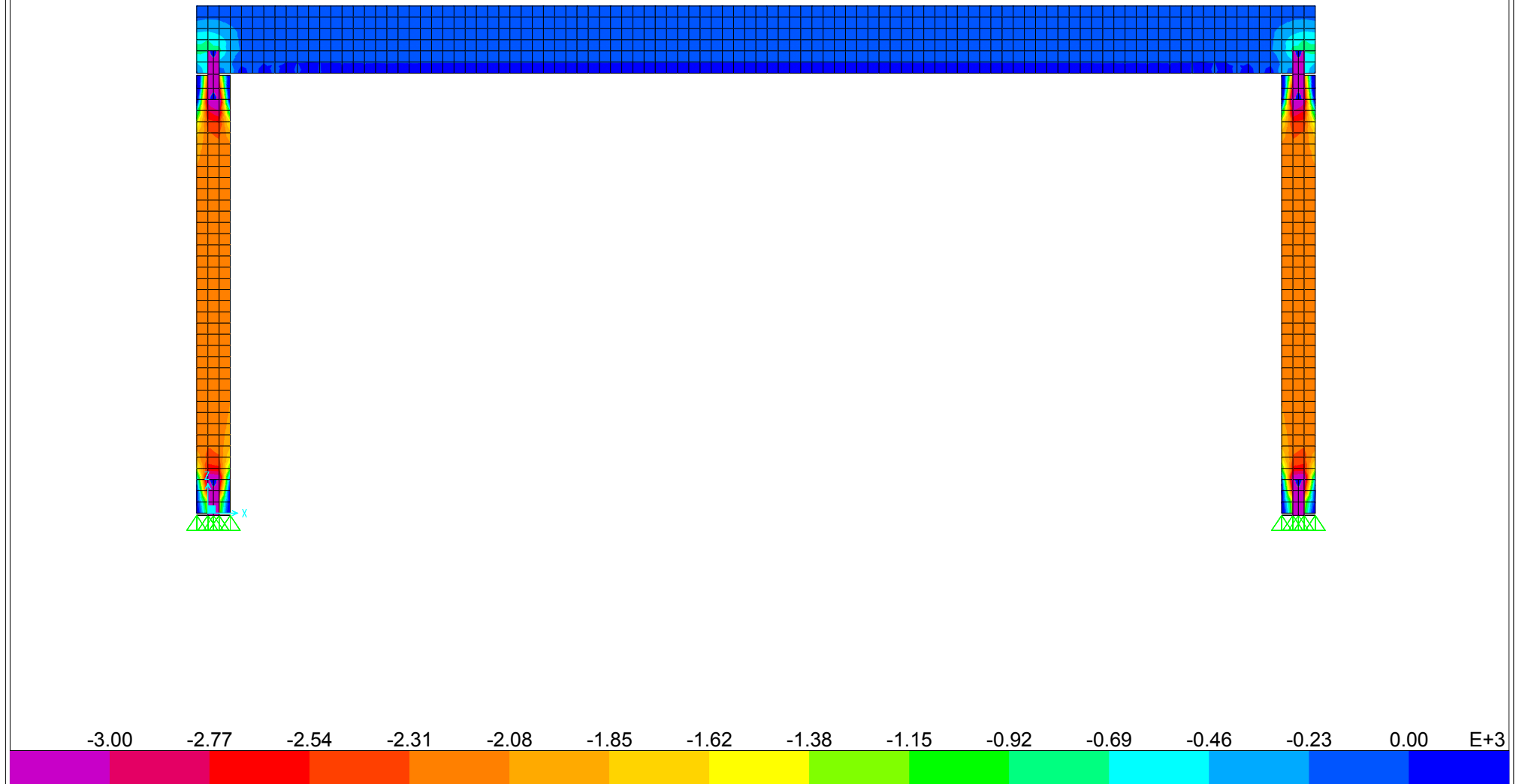


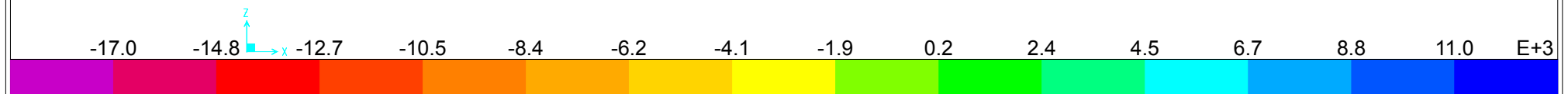
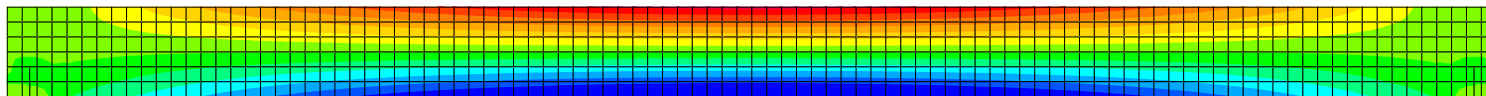


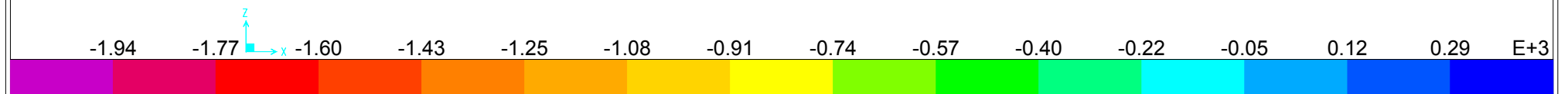
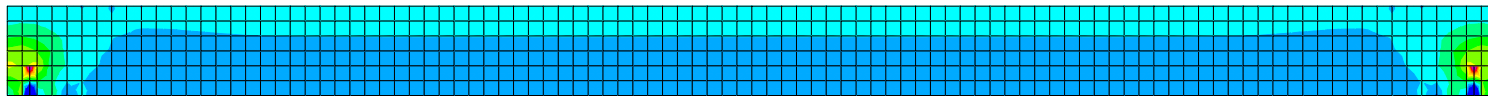


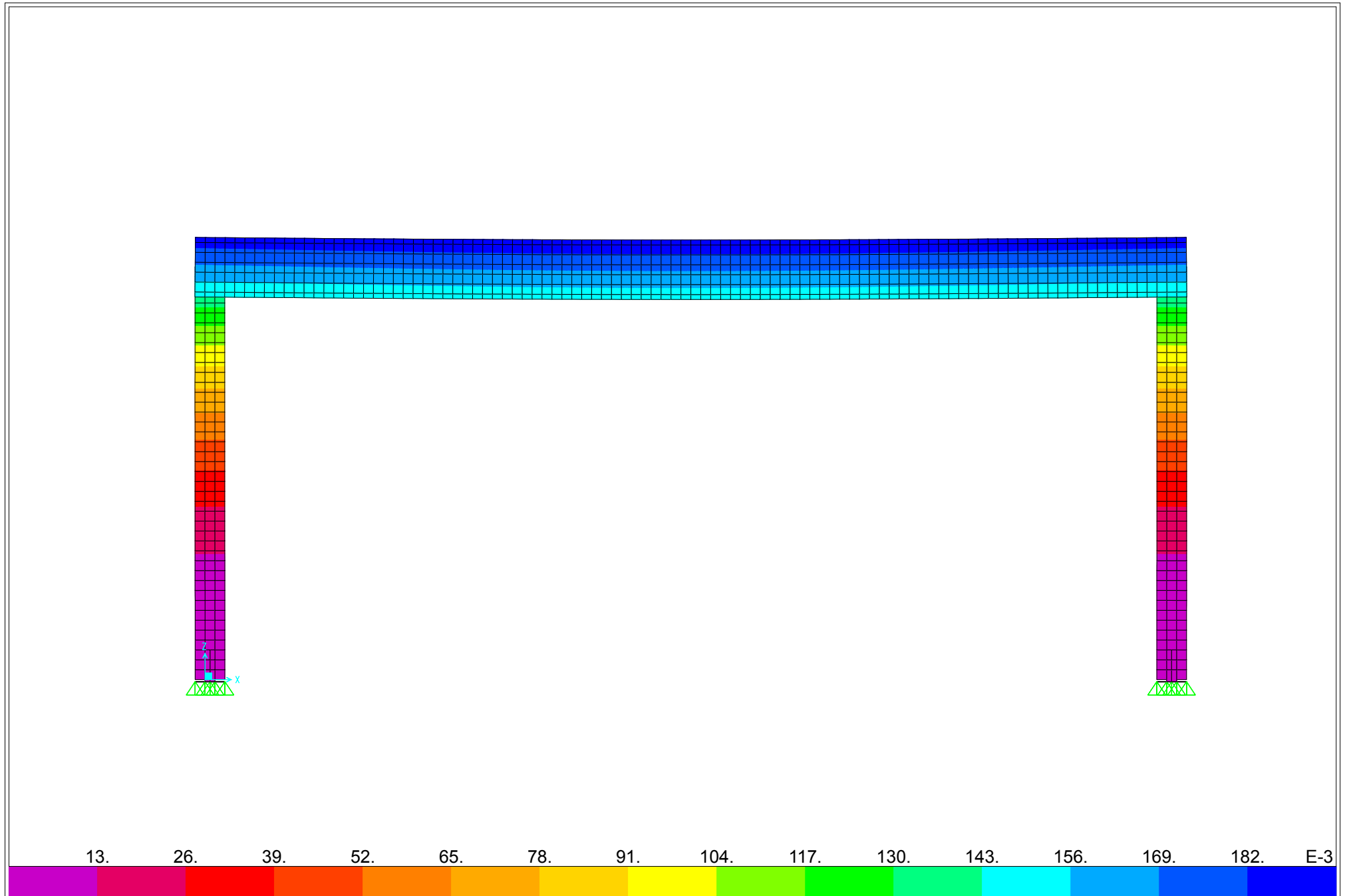


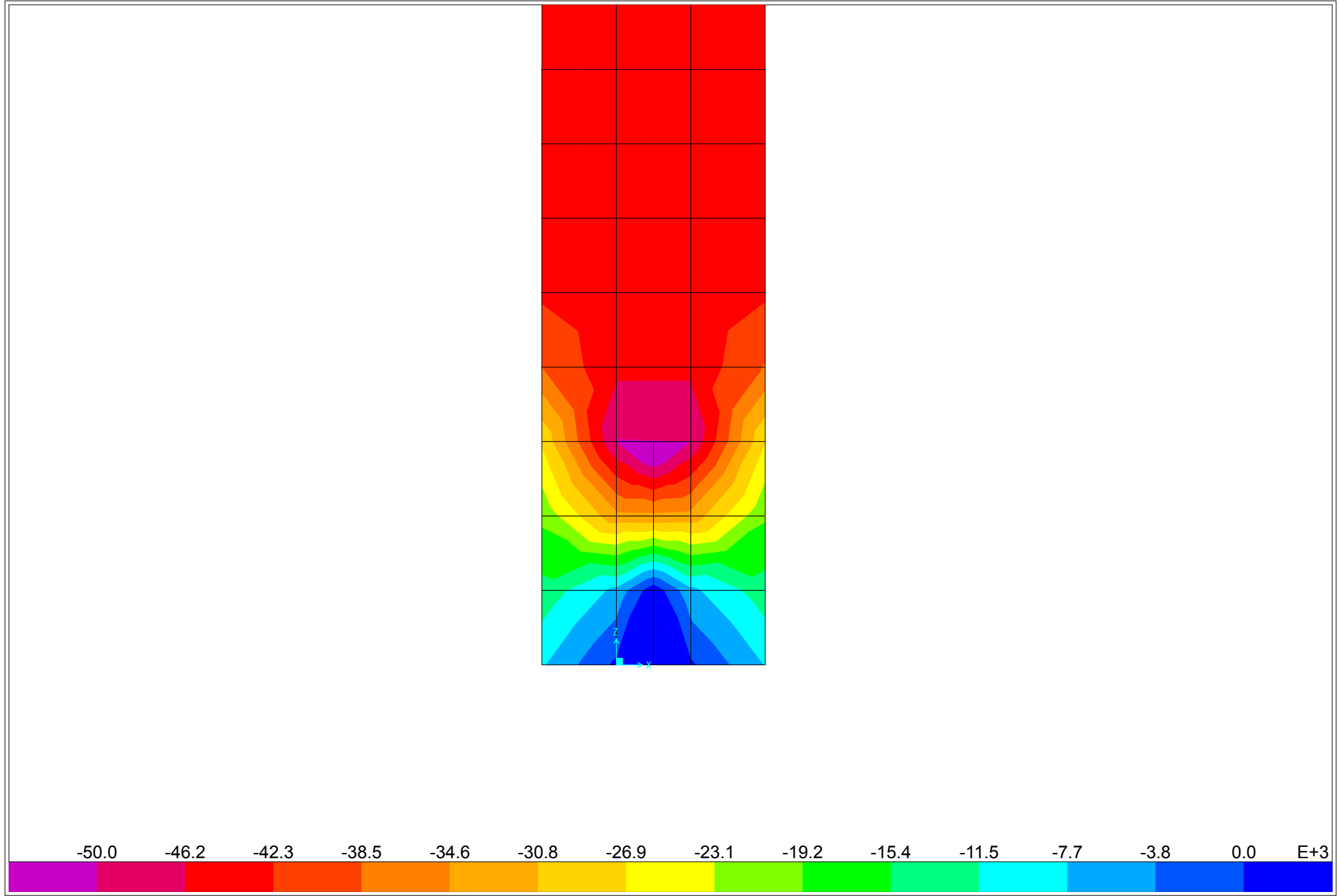




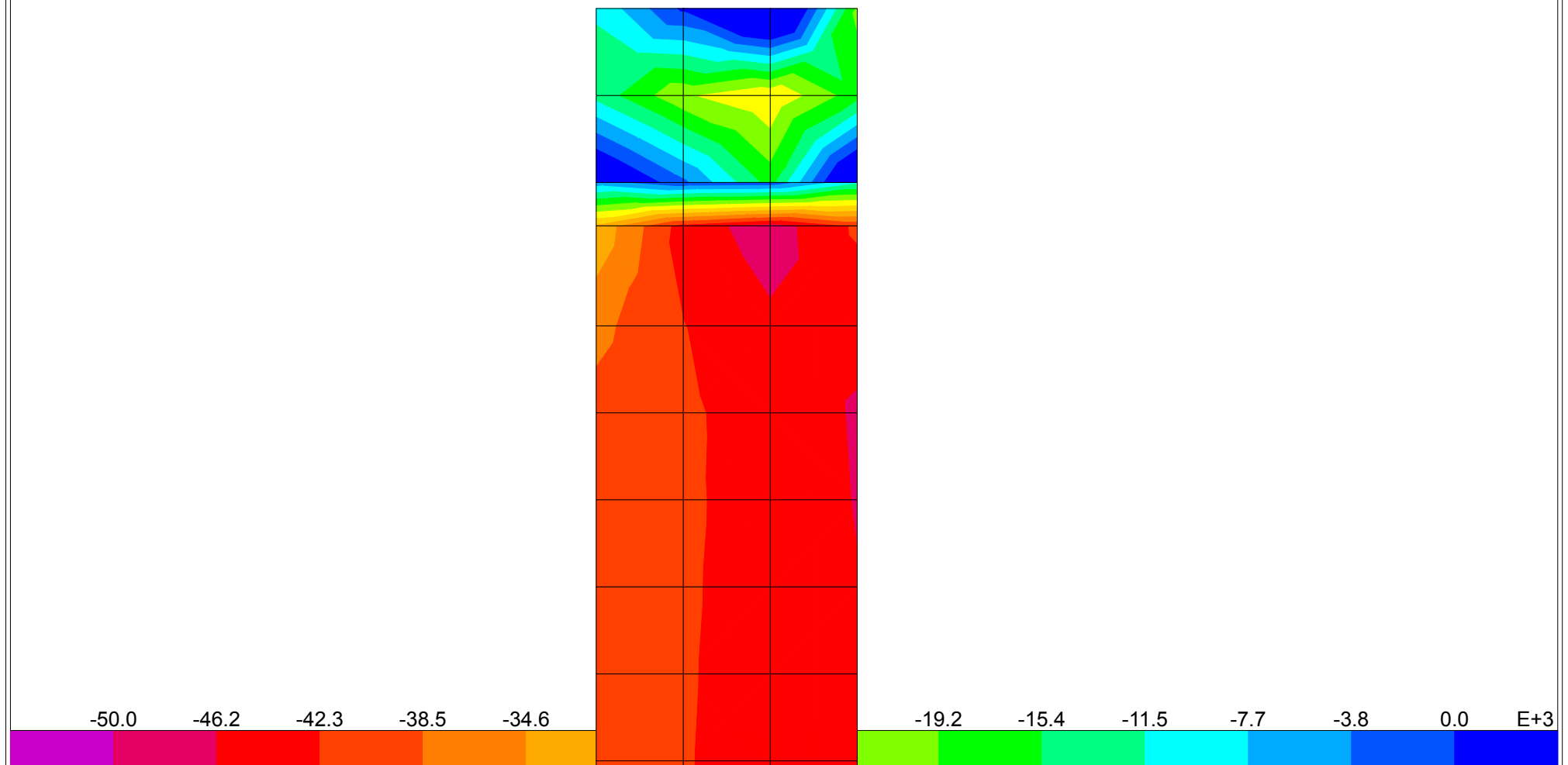


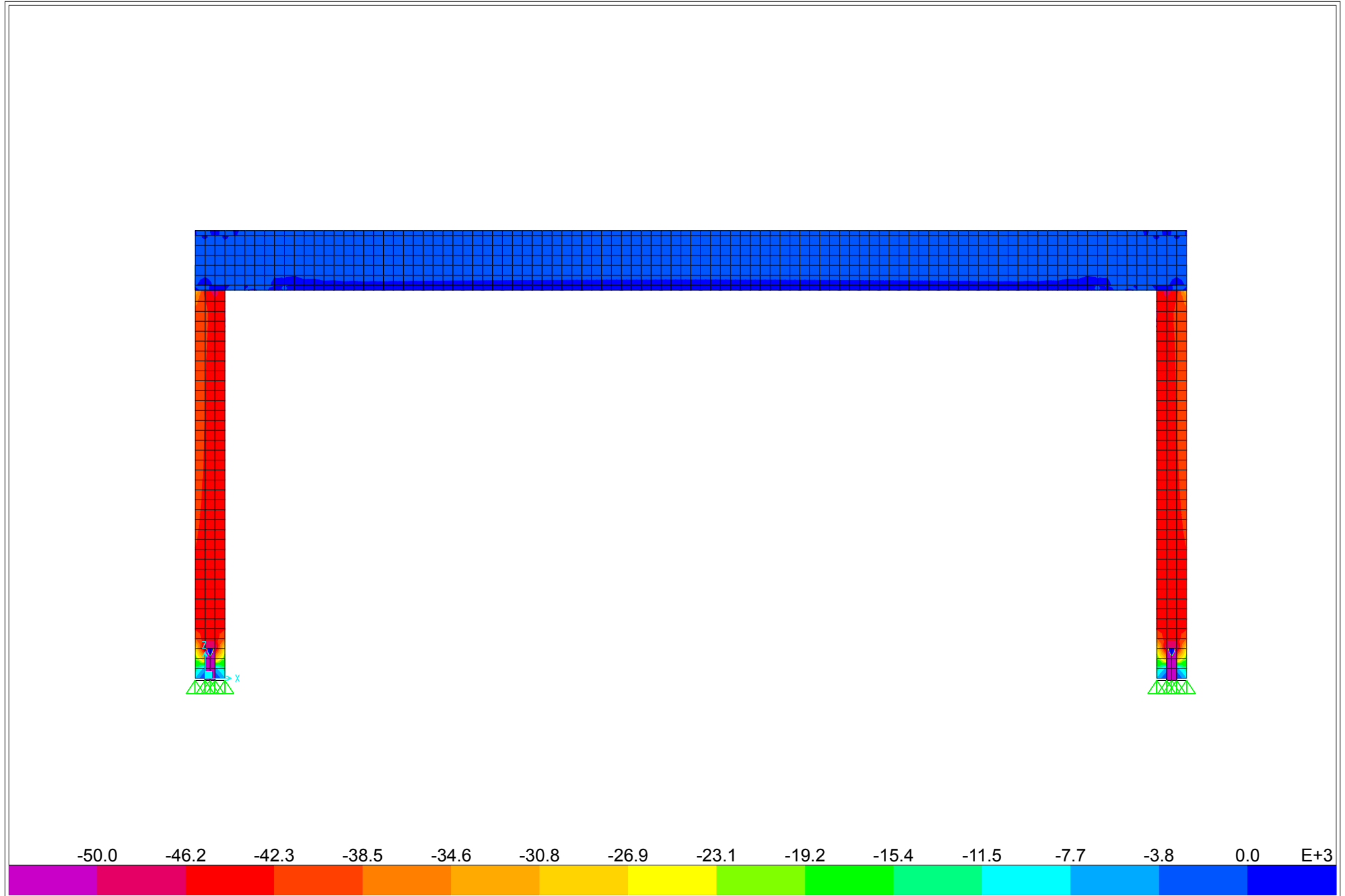


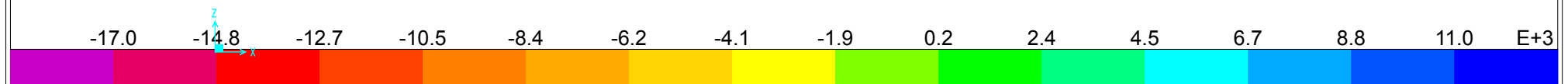
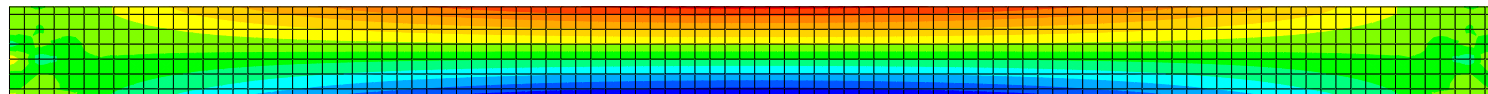


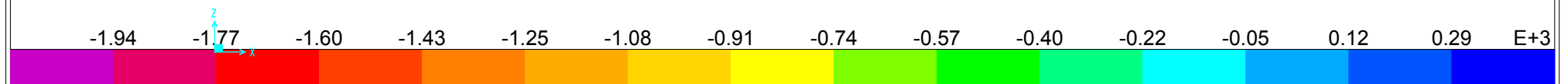
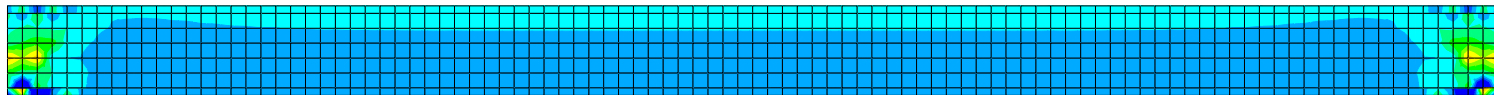


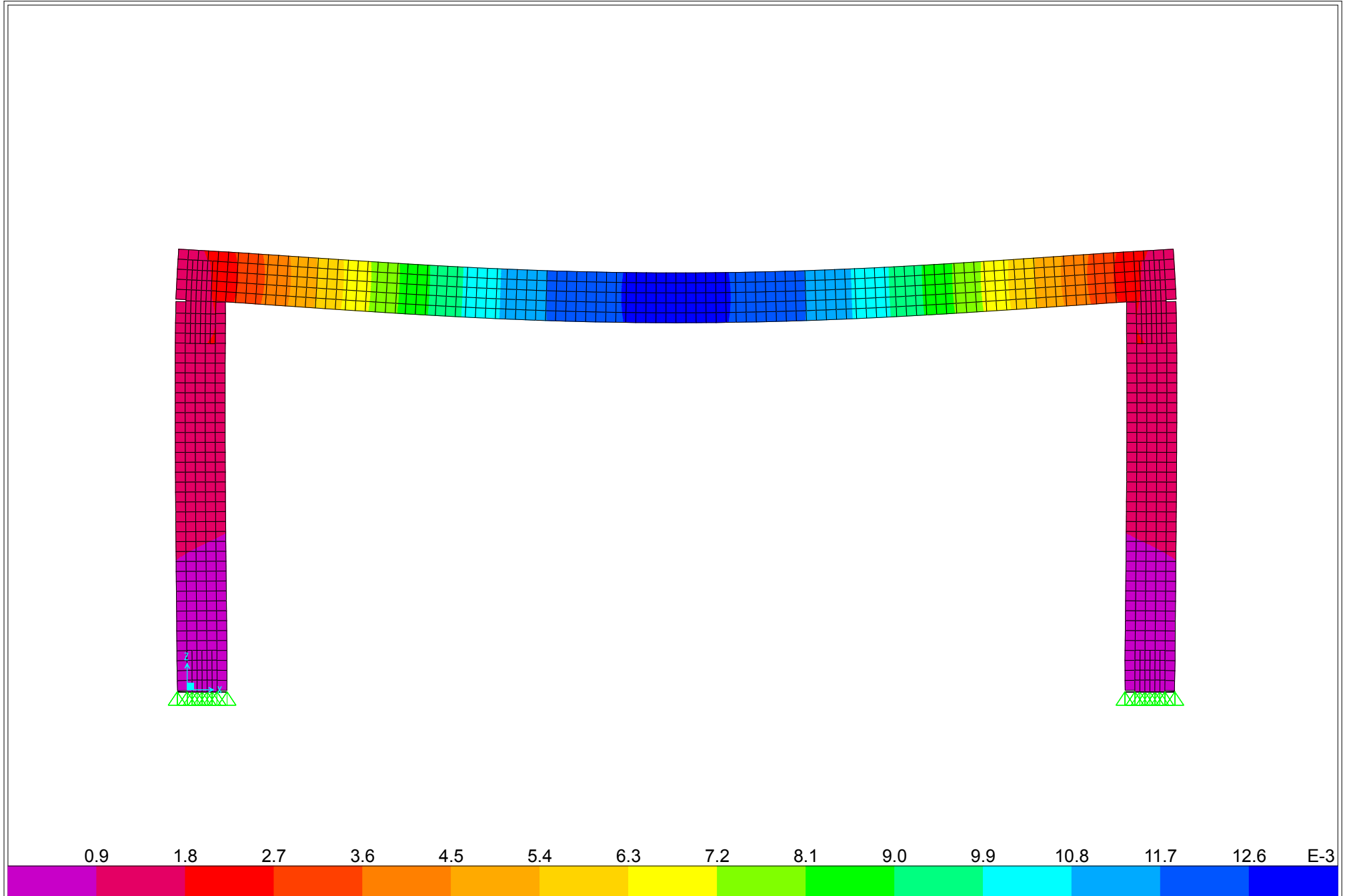




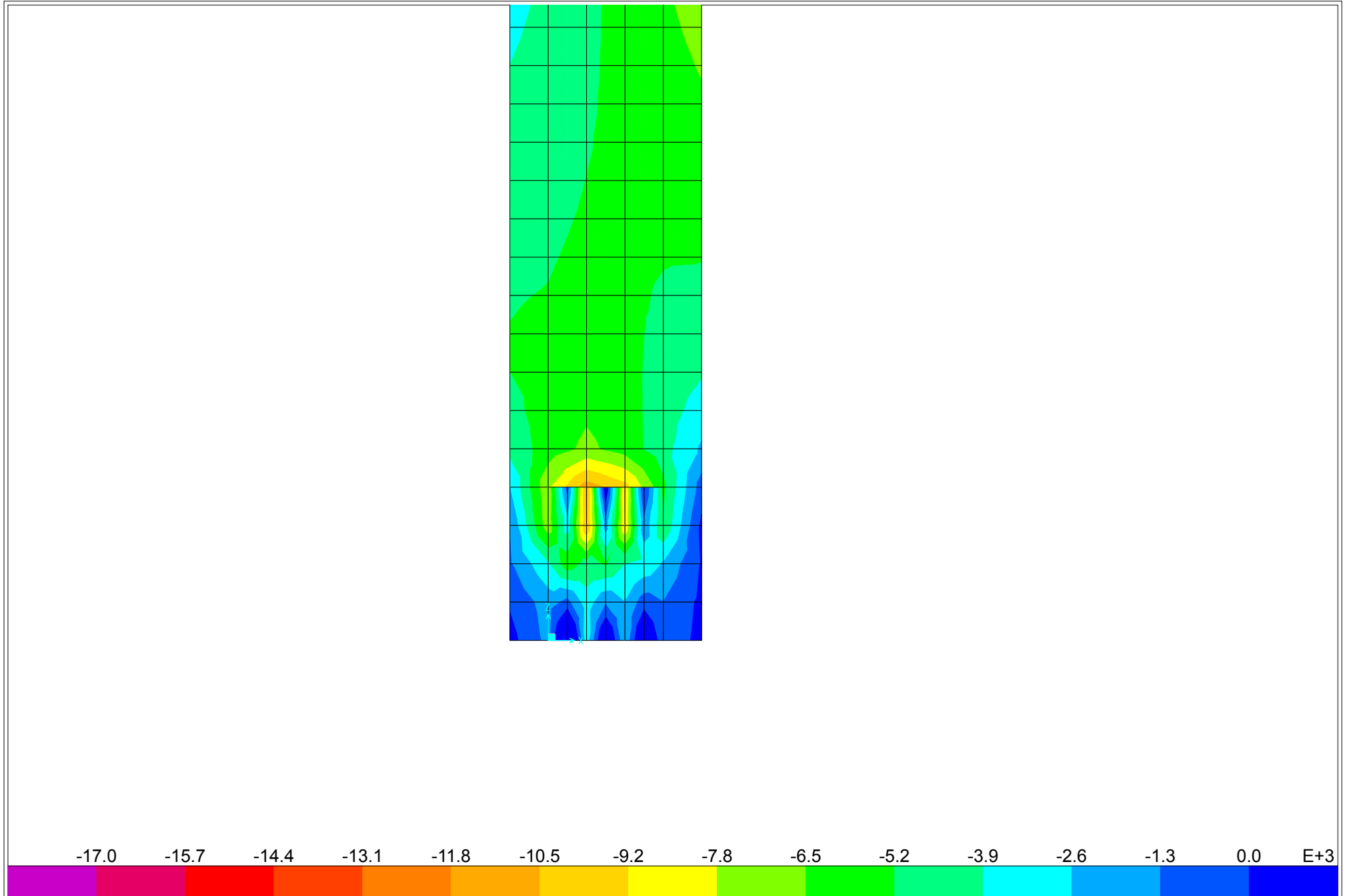


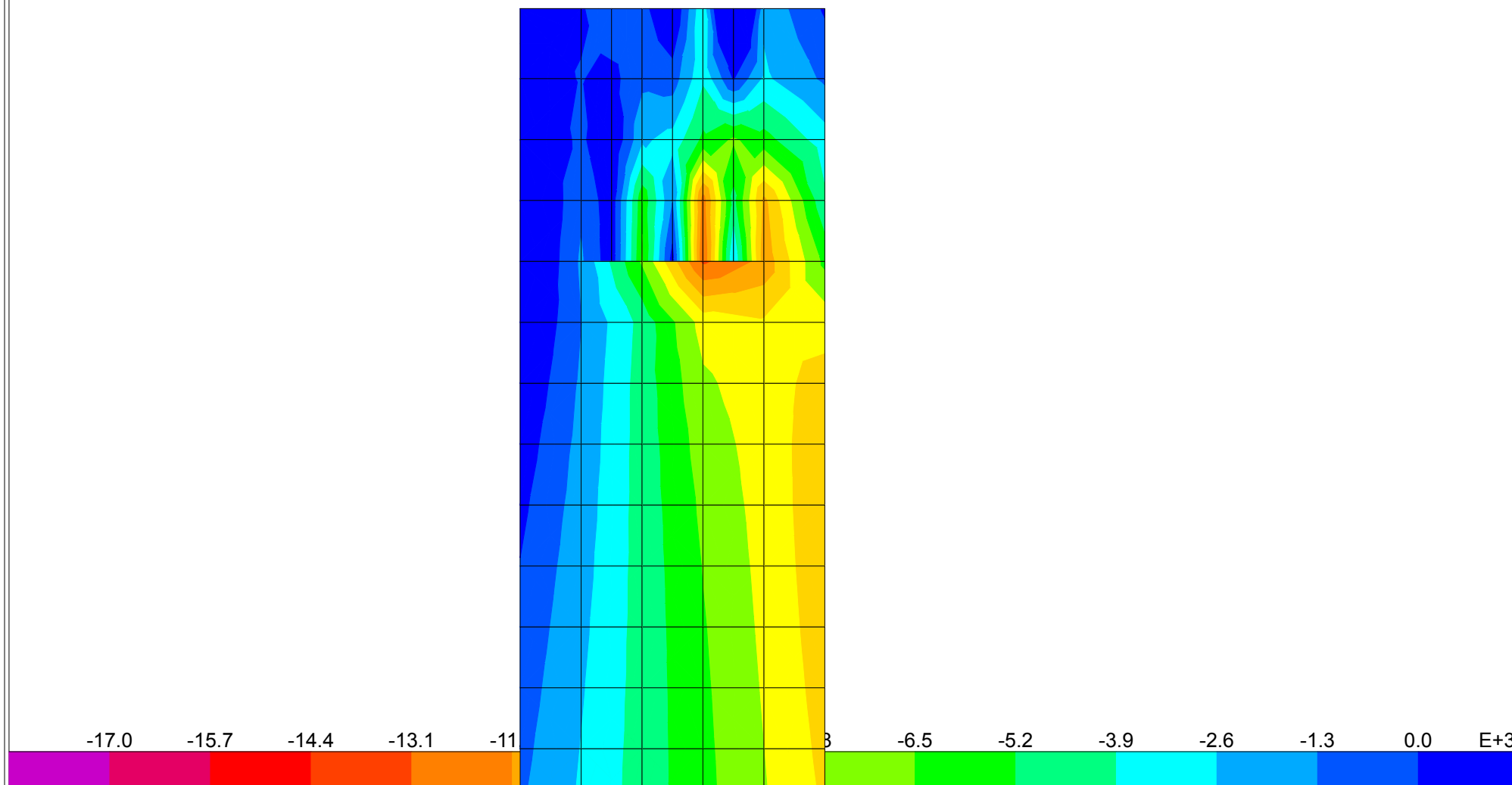


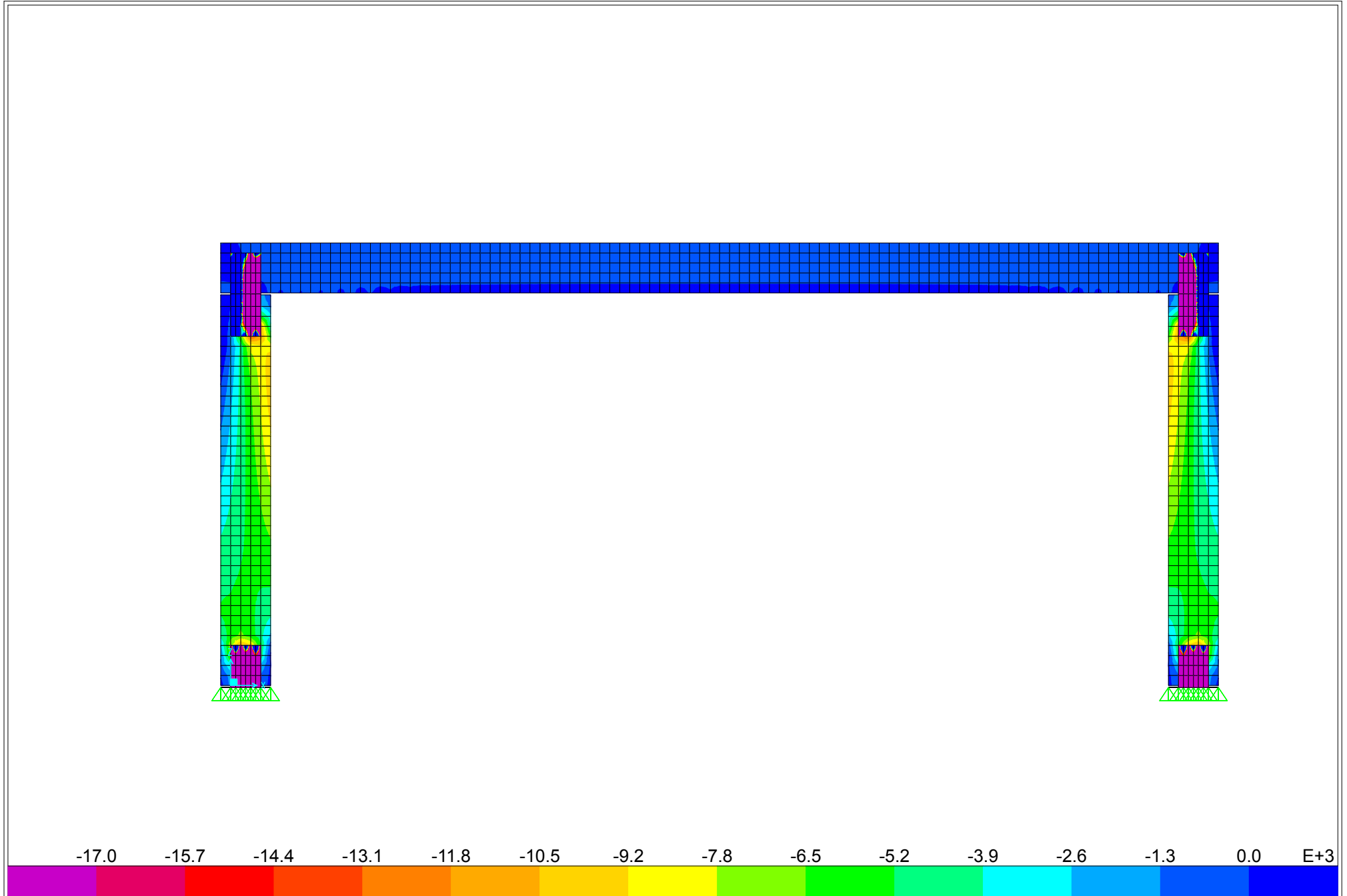


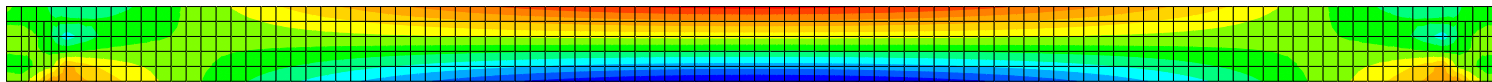




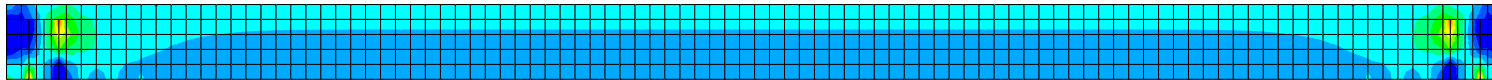




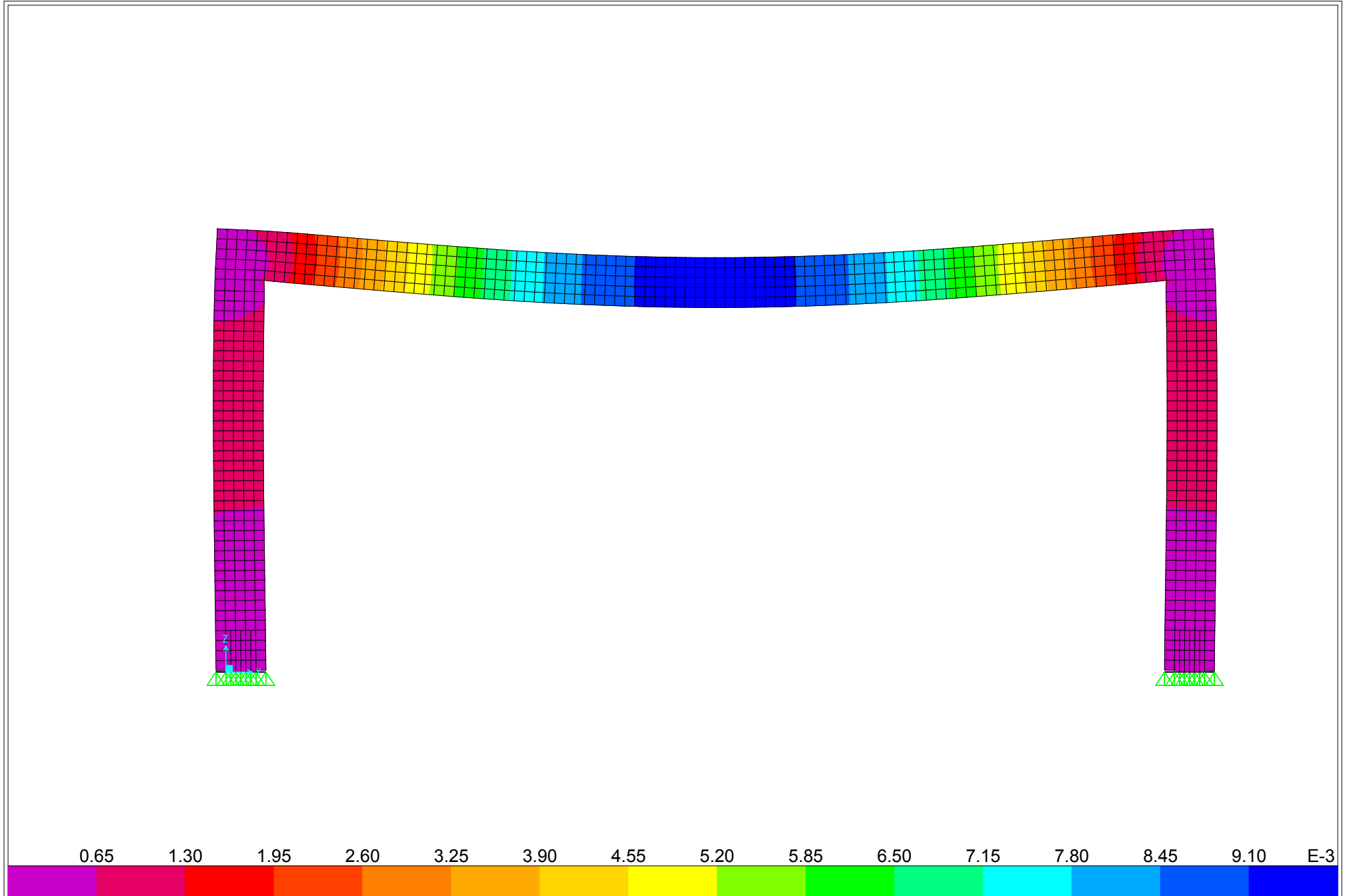




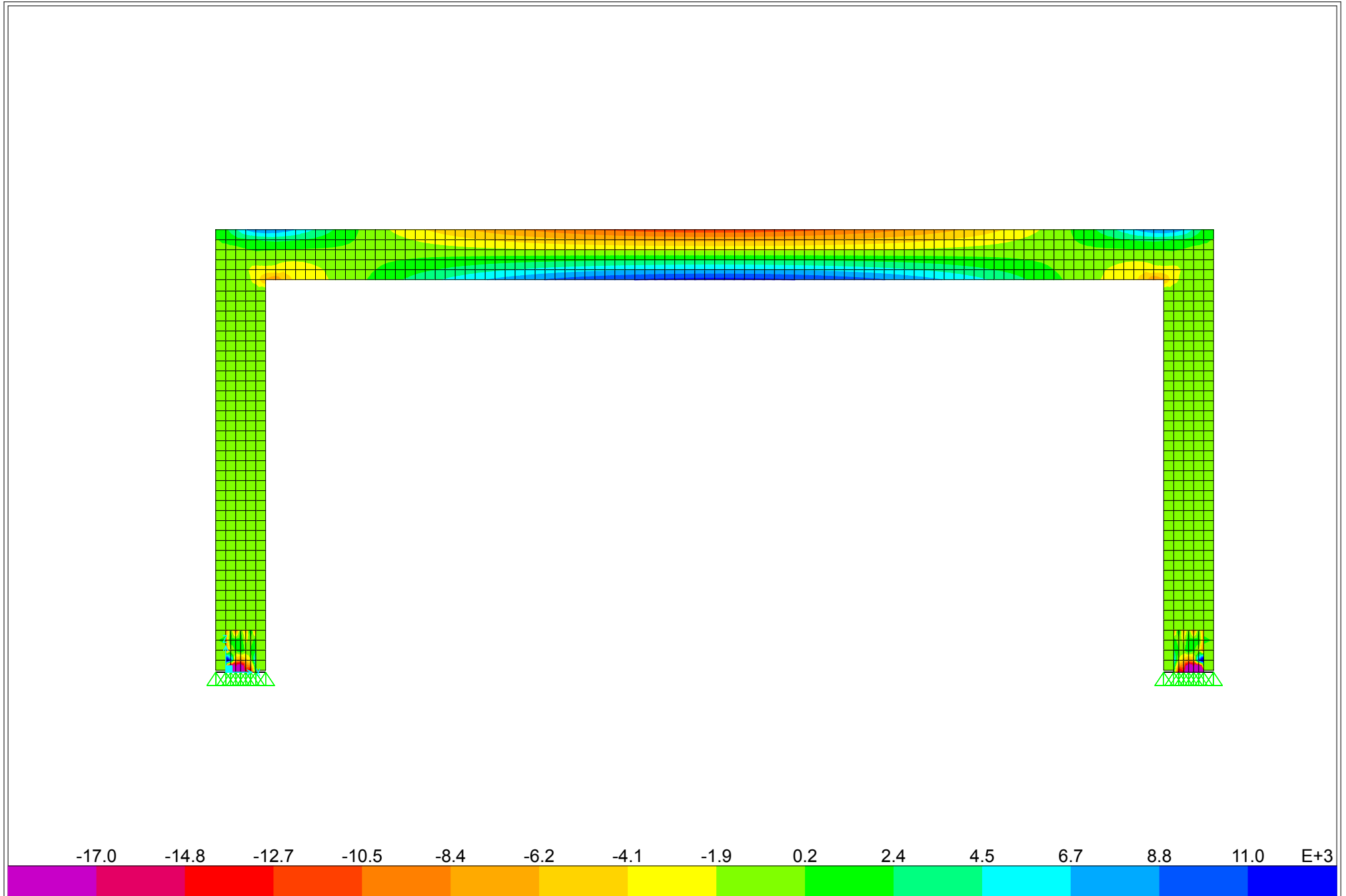
-17.0 -14.8 -12.7 -10.5 -8.4 -6.2 -4.1 -1.9 0.2 2.4 4.5 6.7 8.8 11.0 E+3

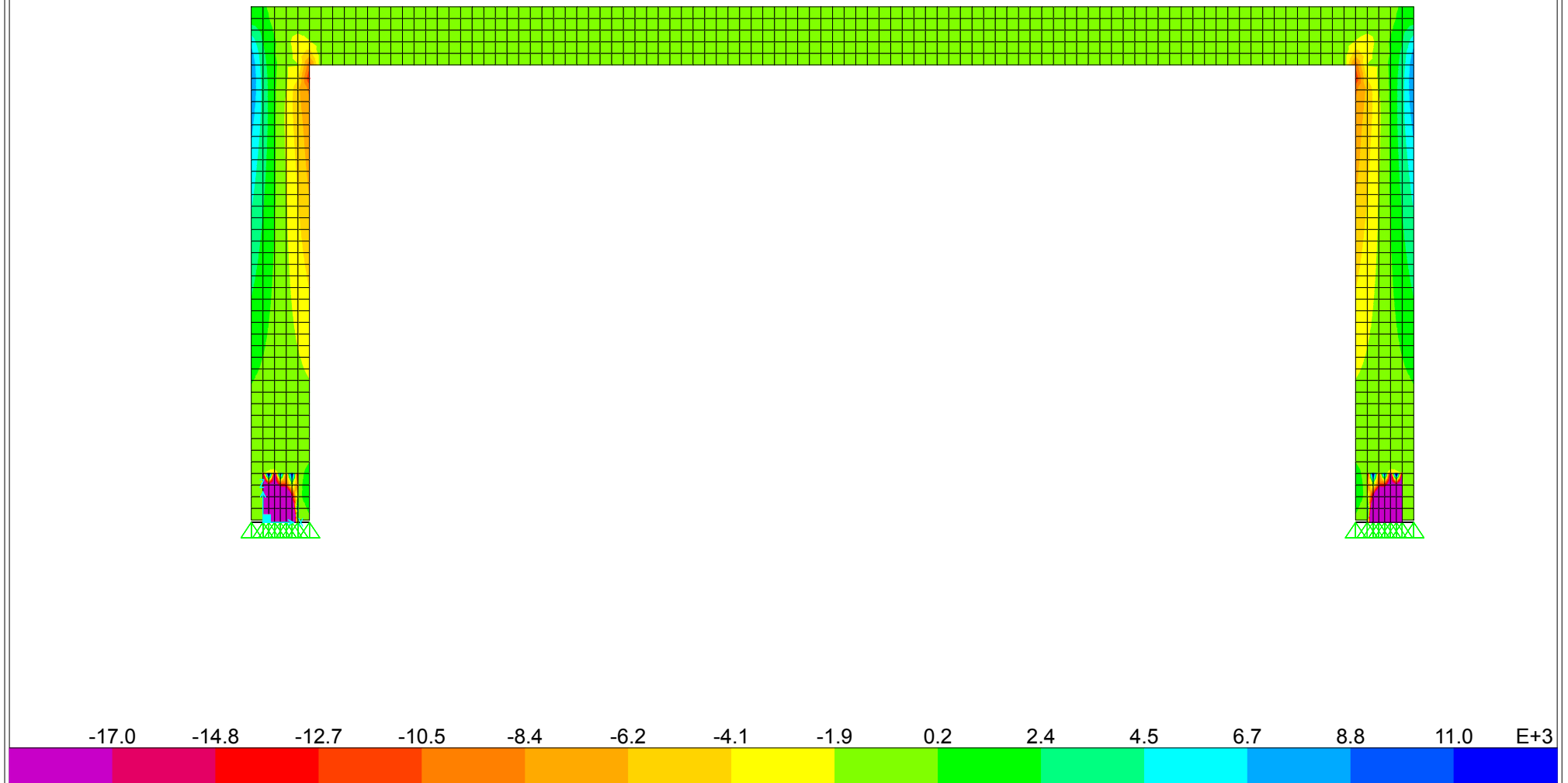


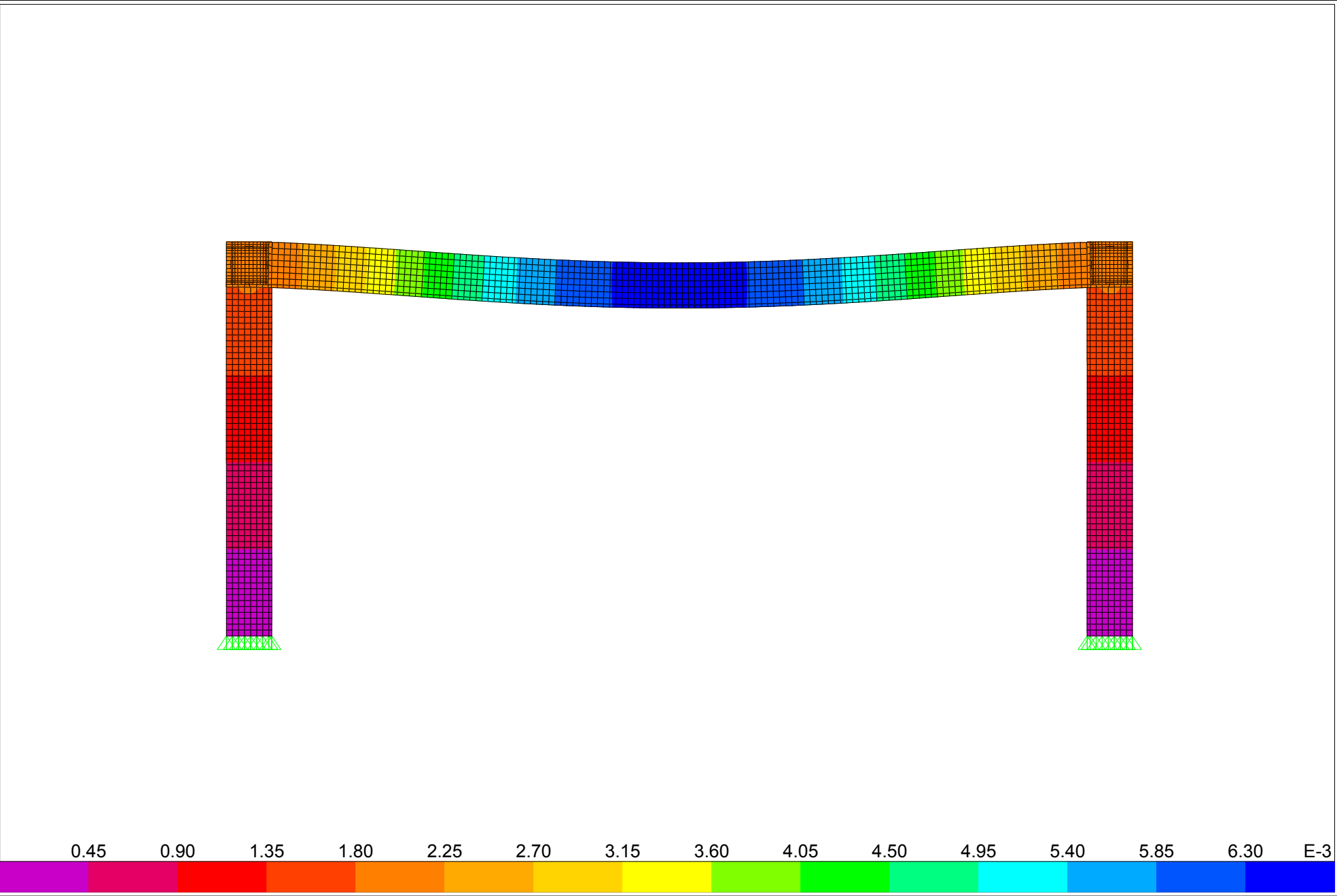
-1.94 -1.77 -1.60 -1.43 -1.25 -1.08 -0.91 -0.74 -0.57 -0.40 -0.22 -0.05 0.12 0.29 E+3



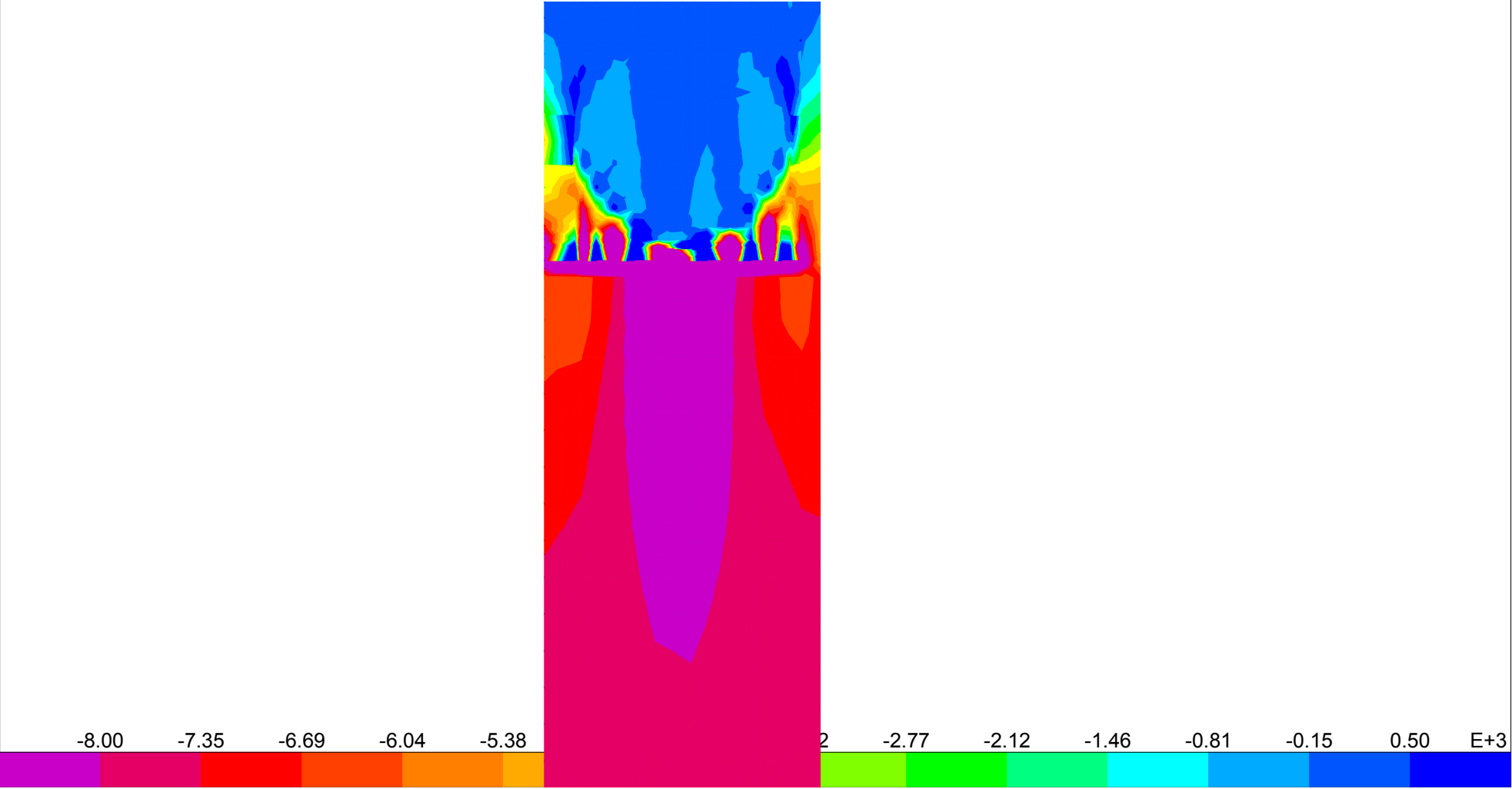


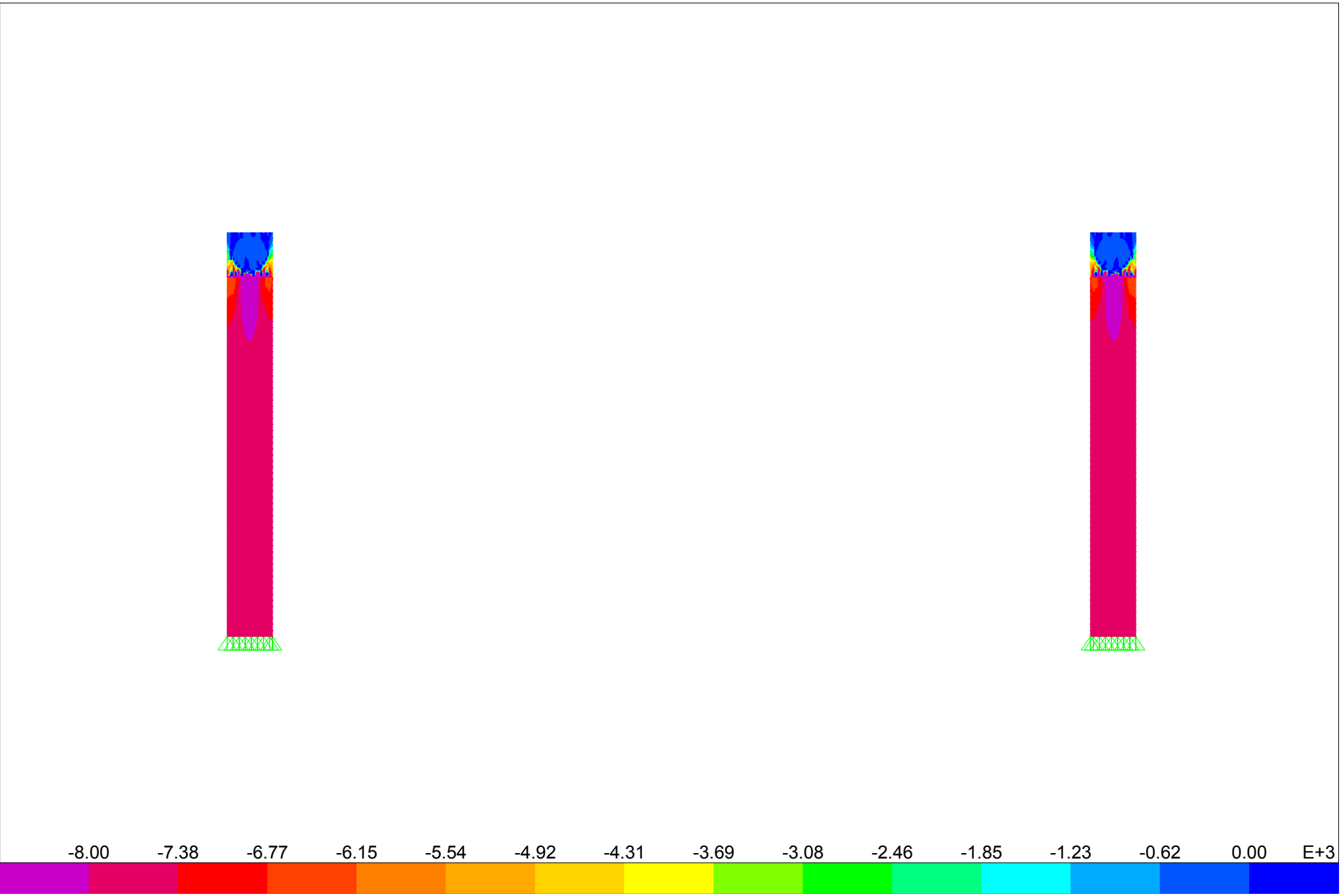


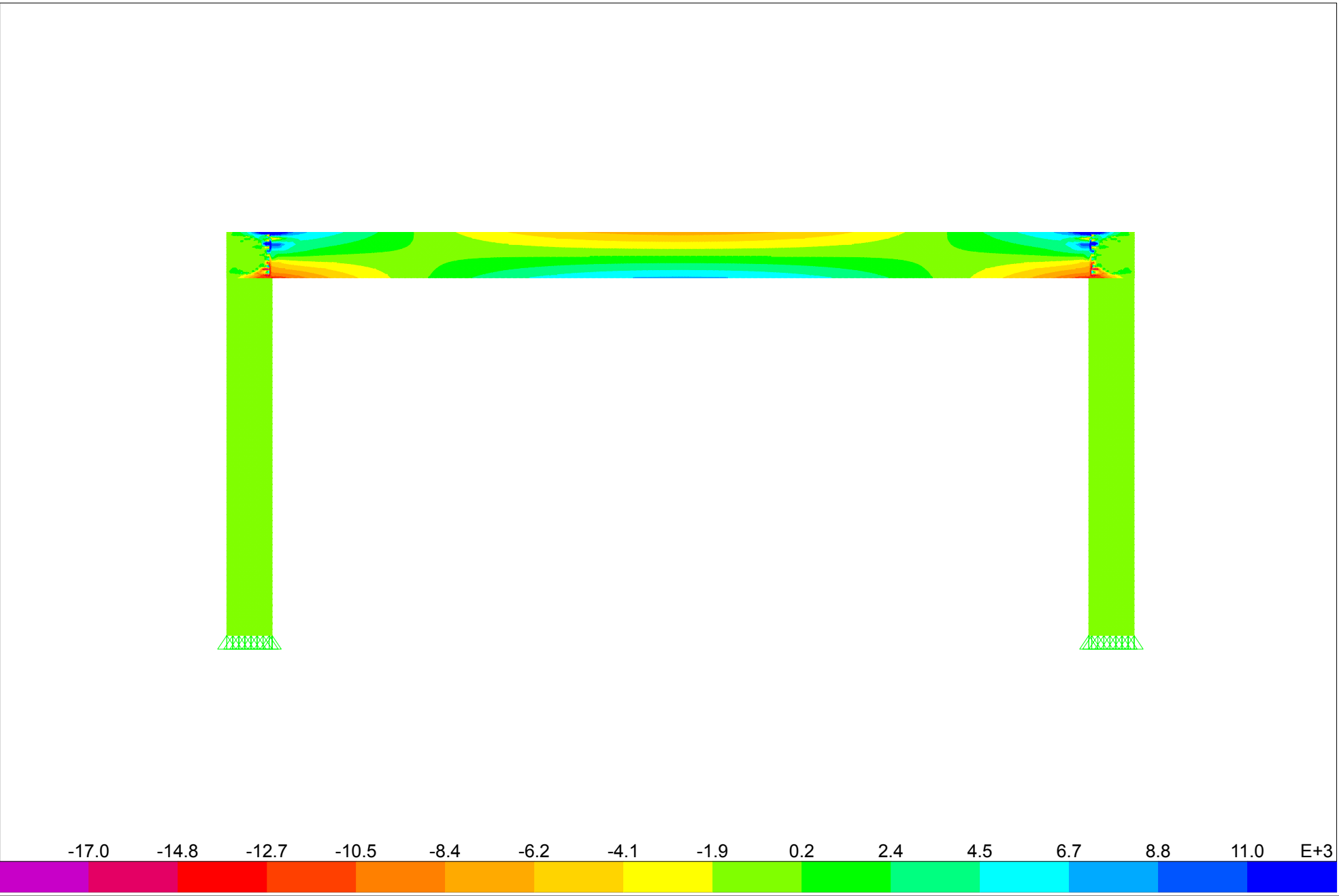


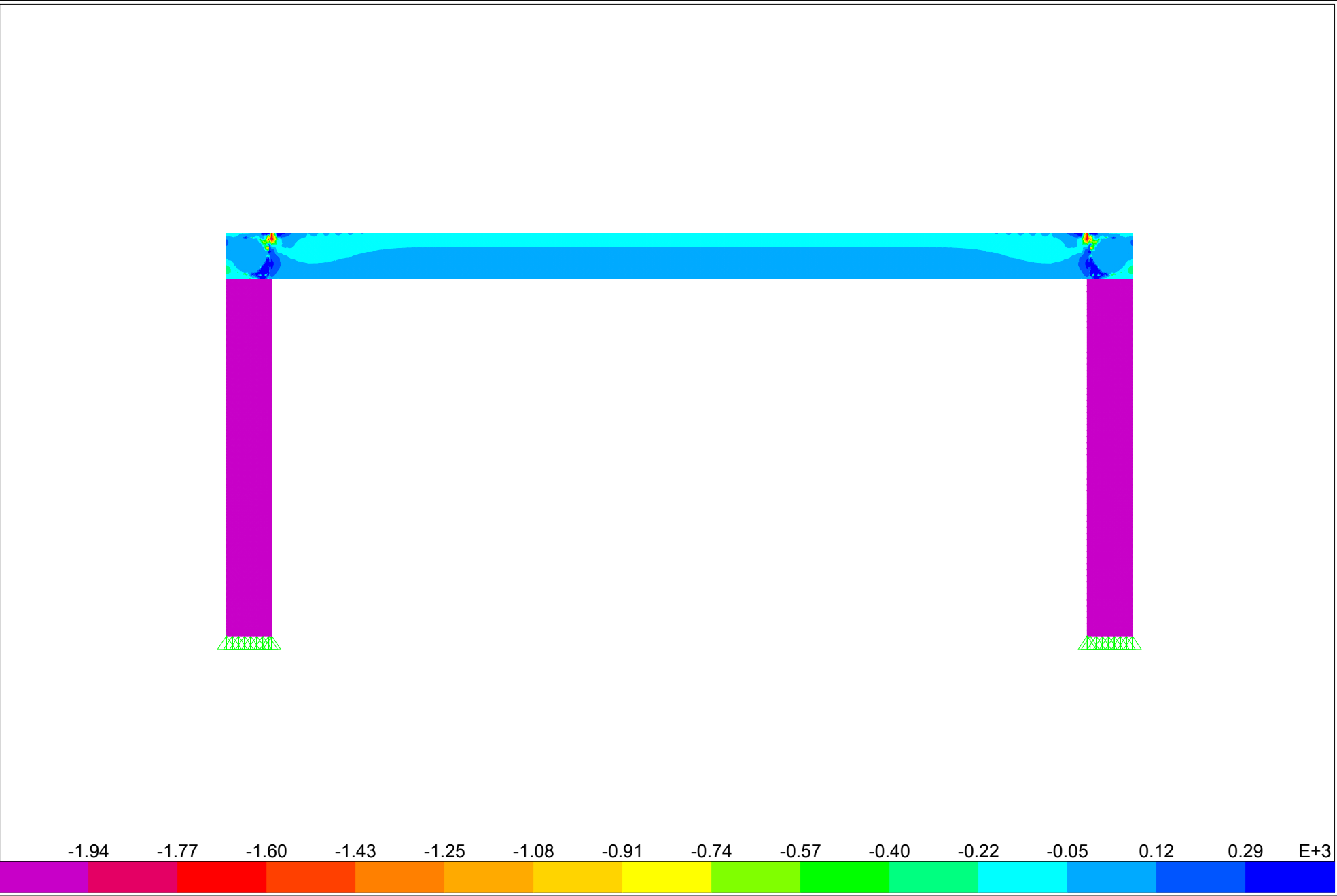


SAP2000 v15.1.0 - File:PÓRTICO 6 - Deformed Shape (ELS\_PERMANENTES) - KN, m, C Units

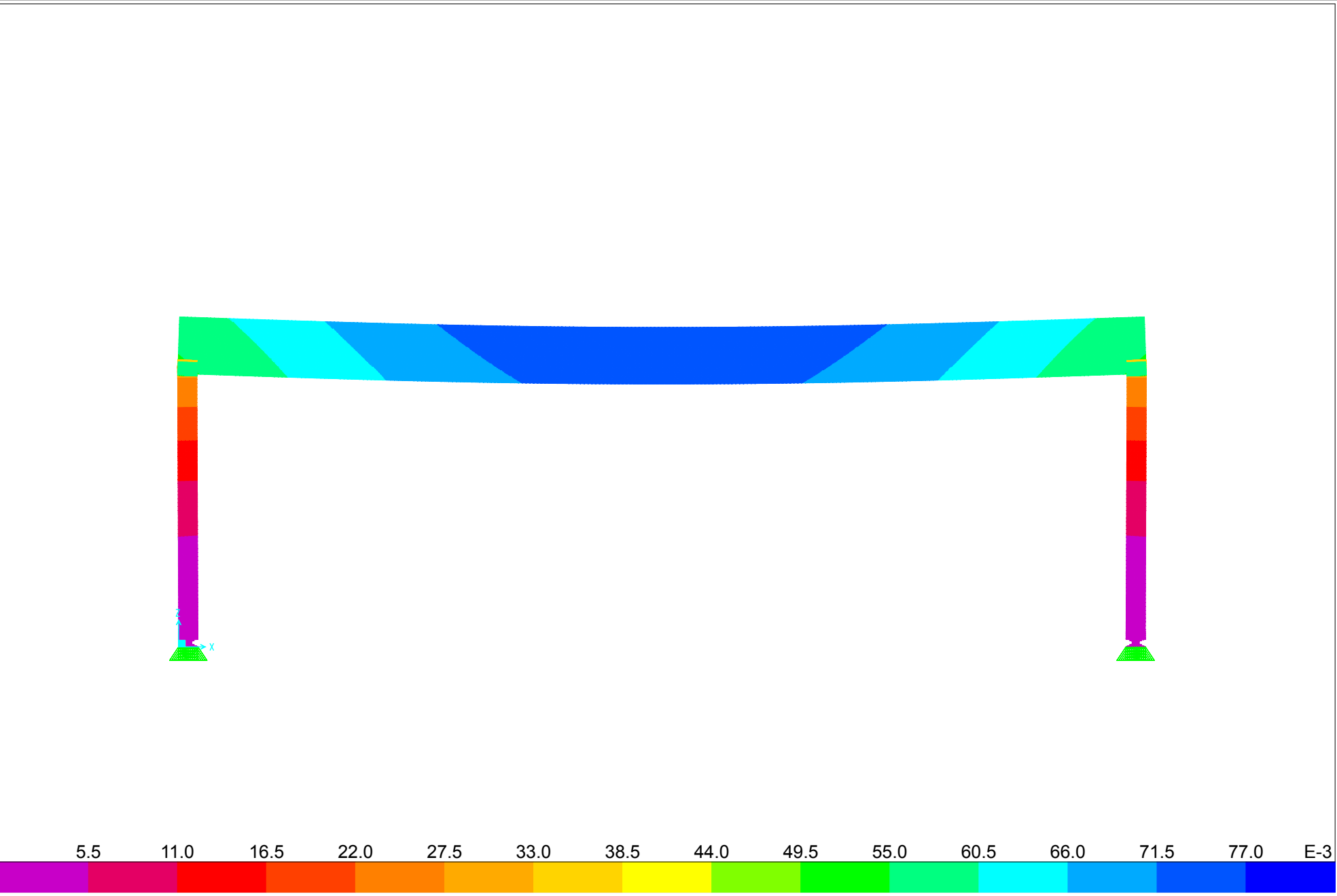


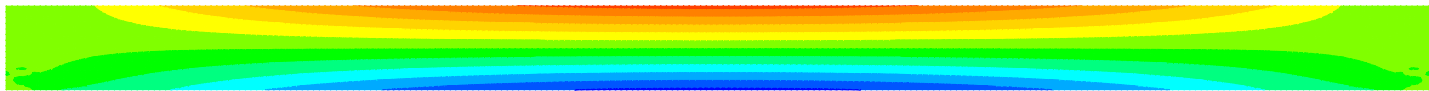


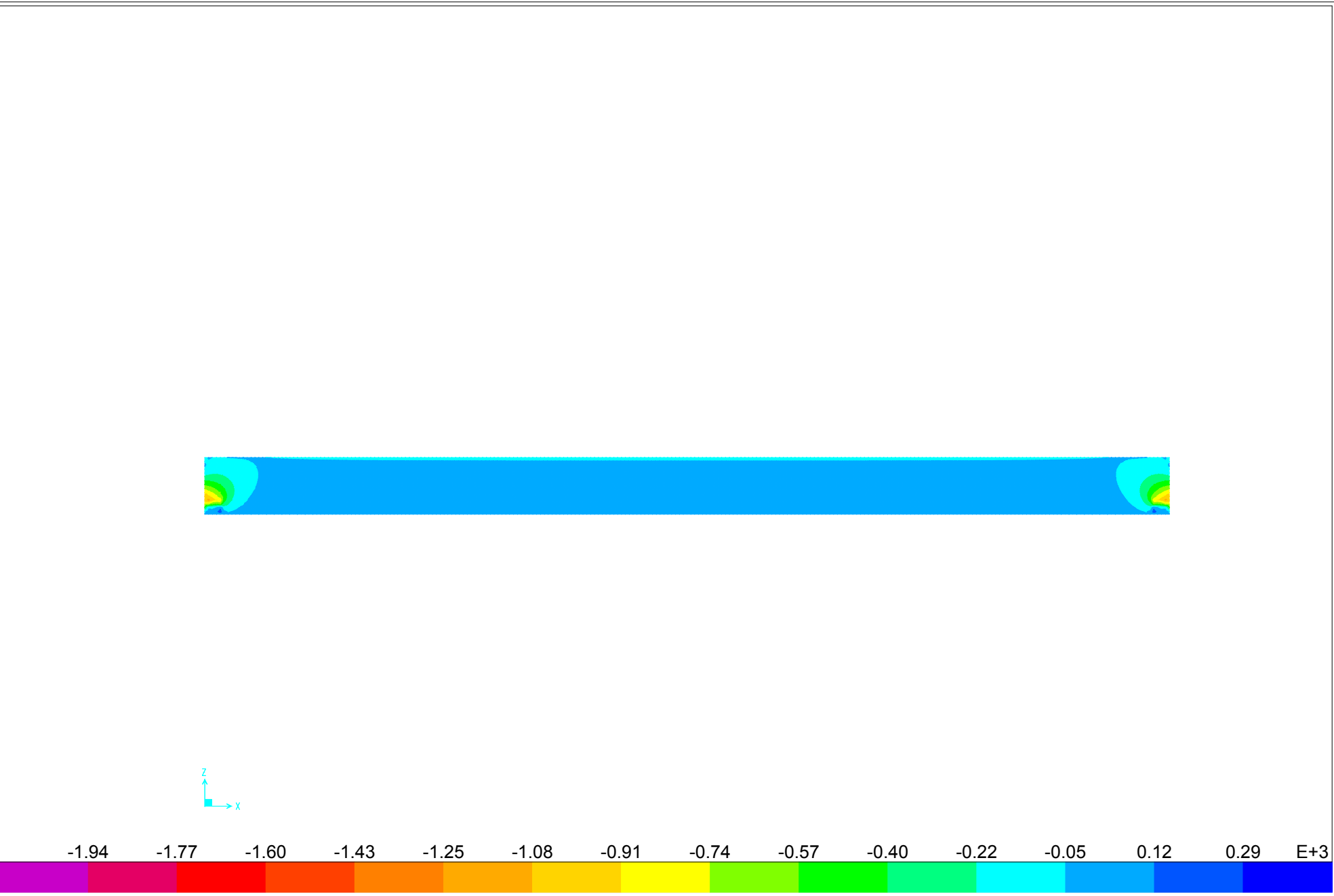


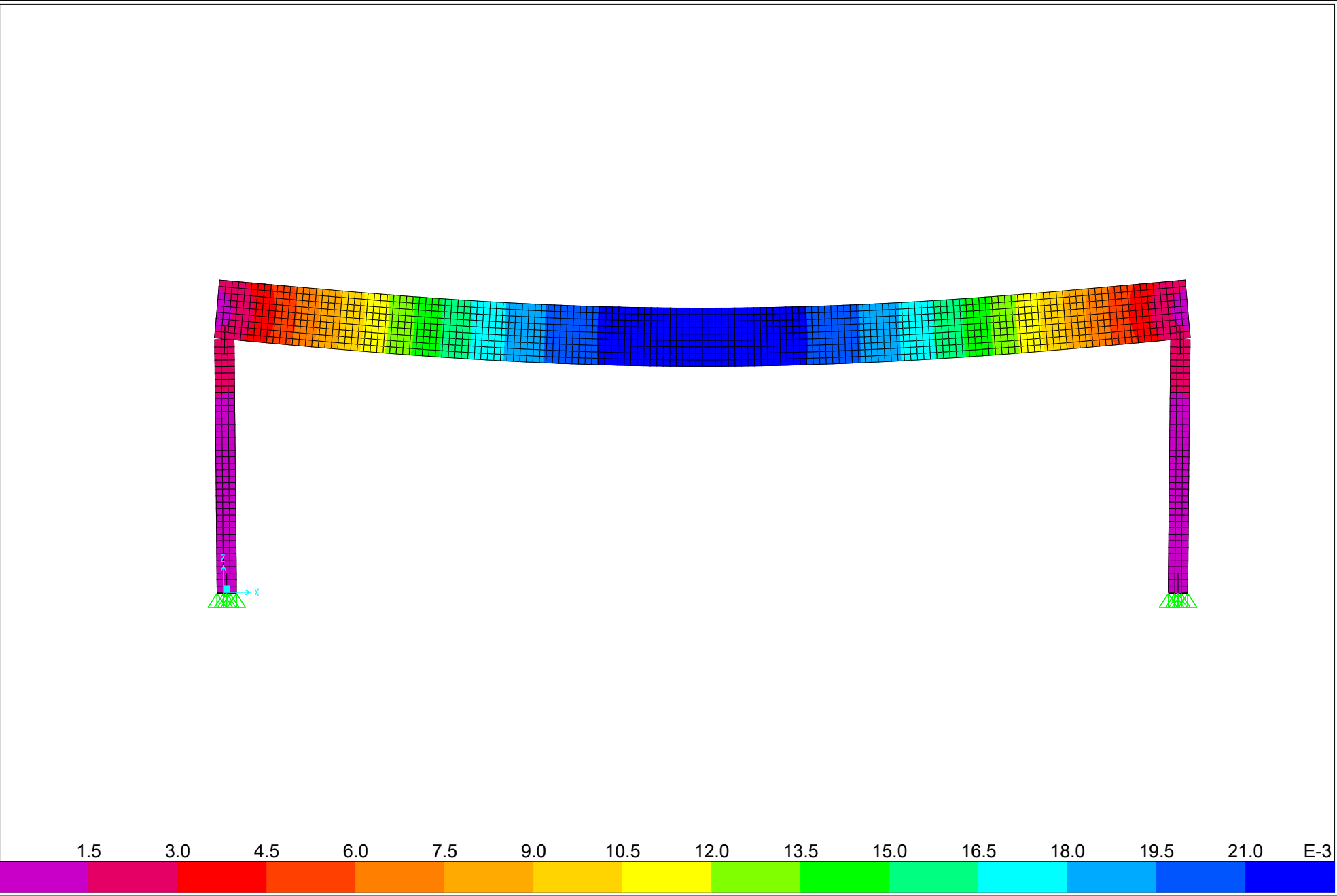


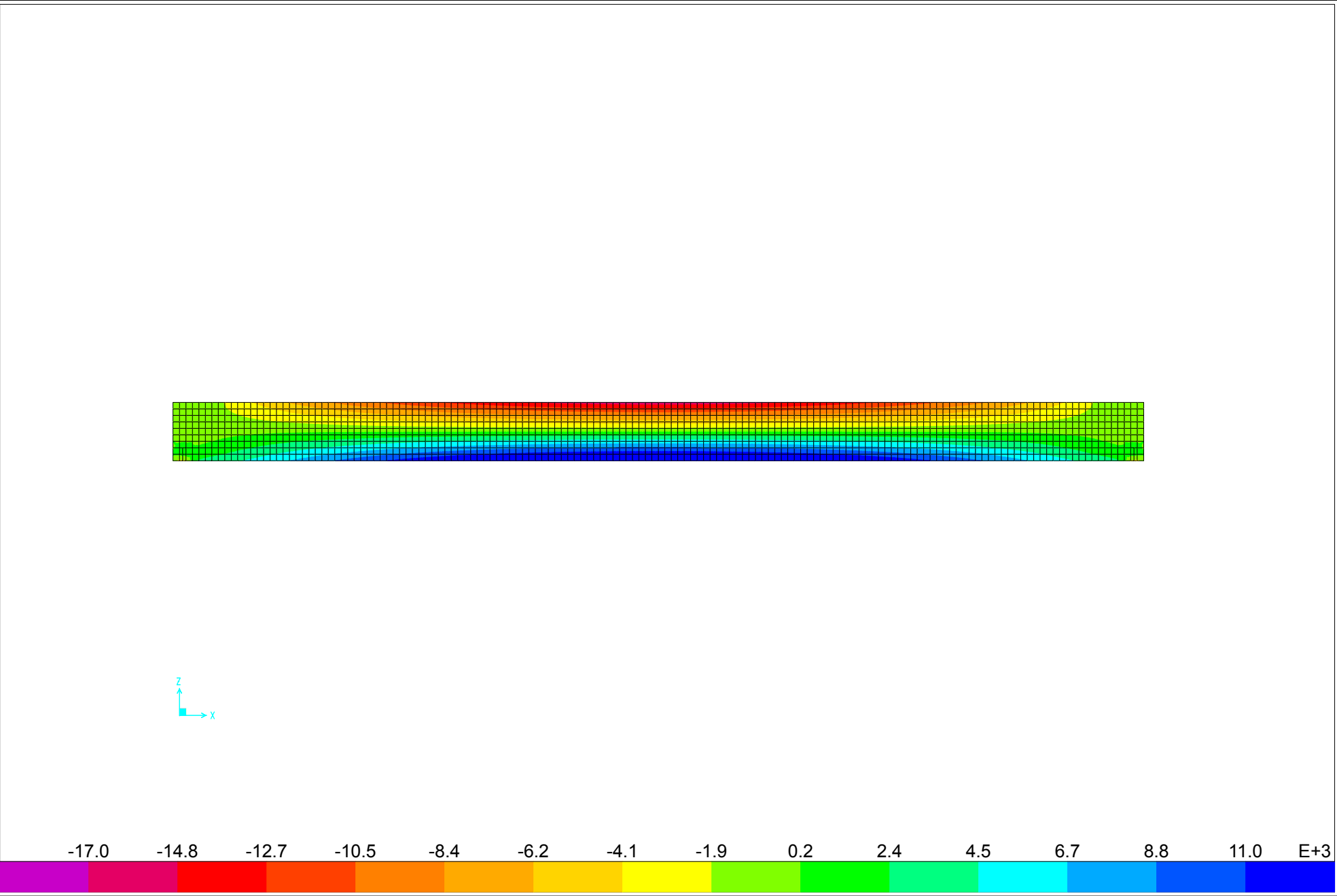


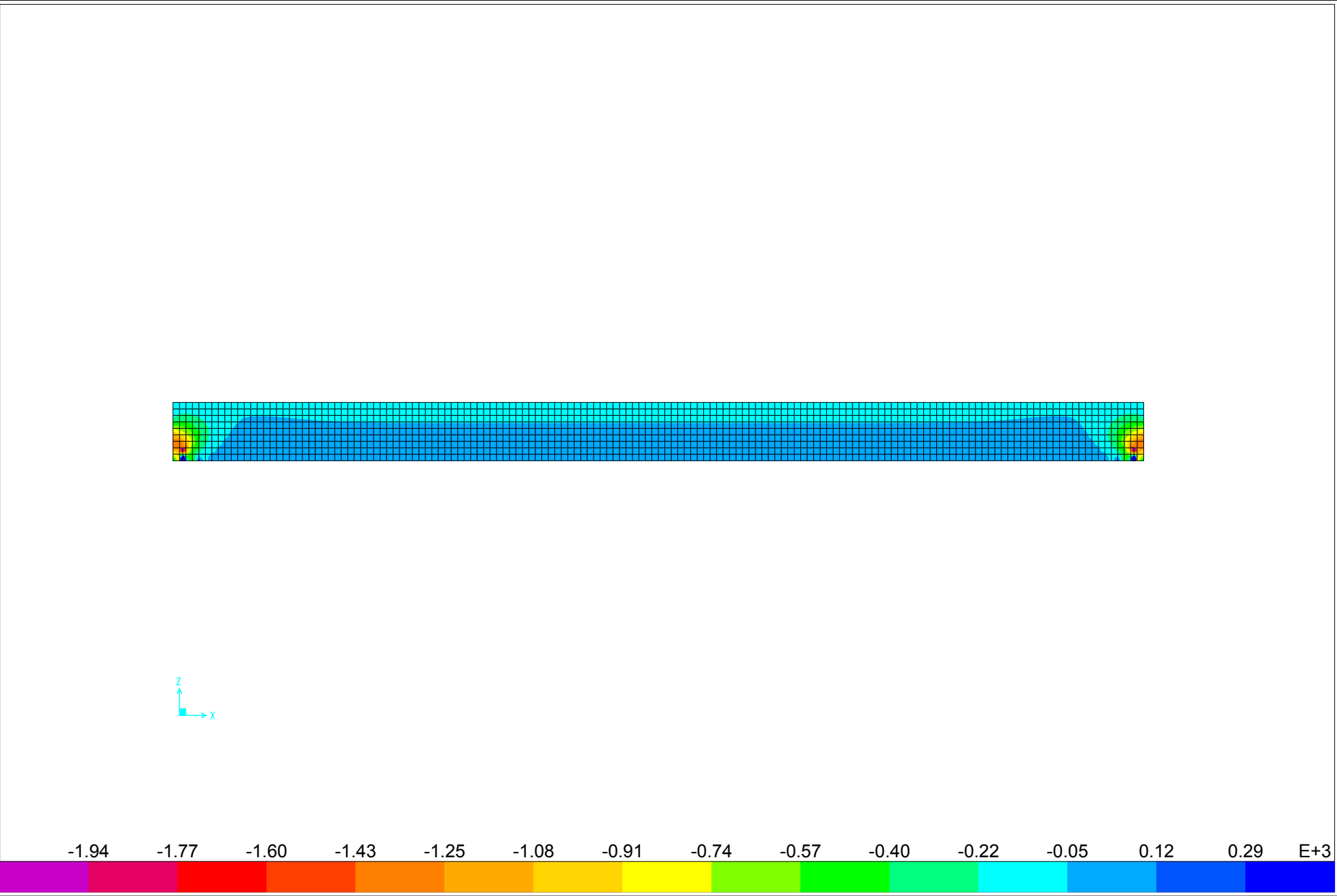




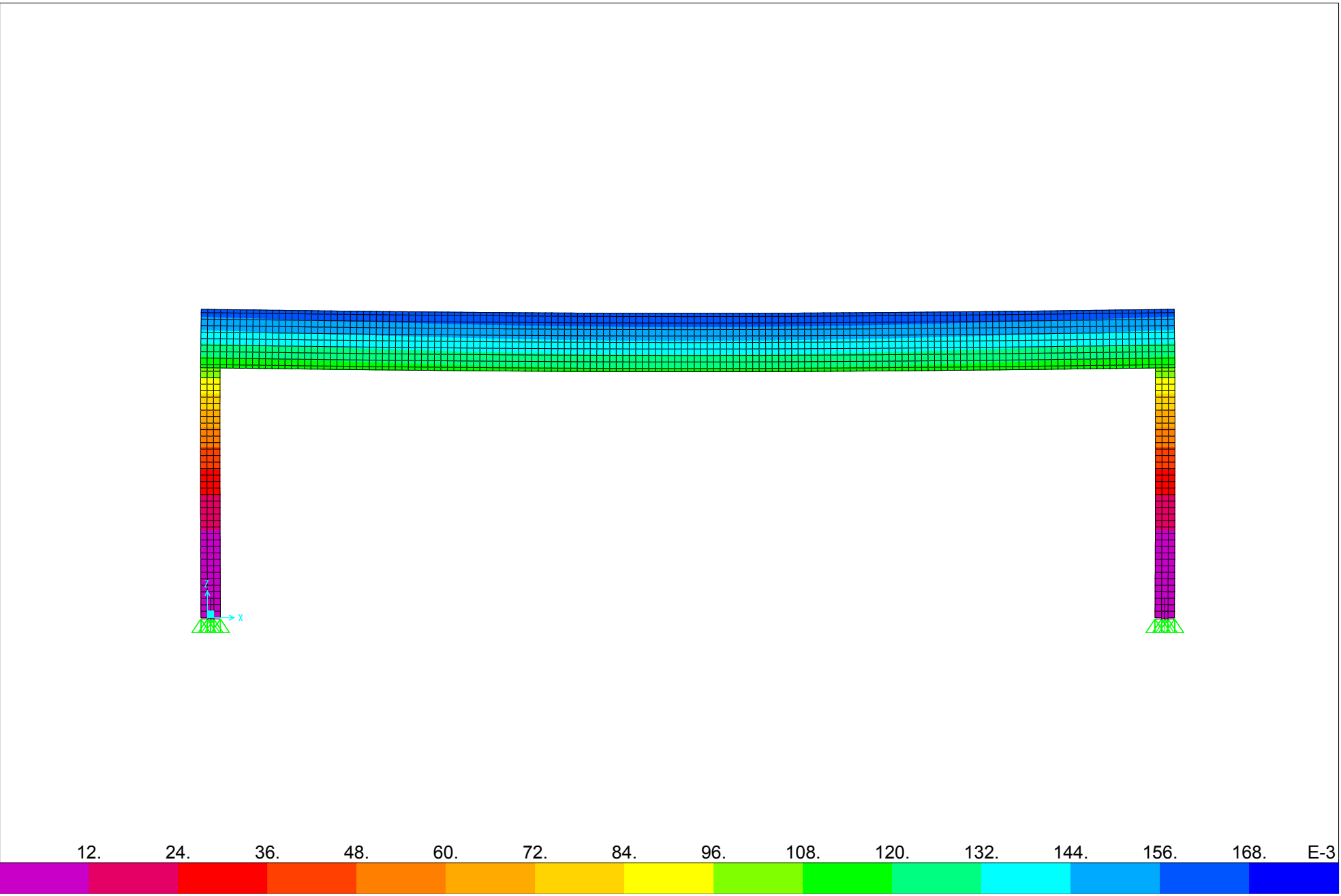


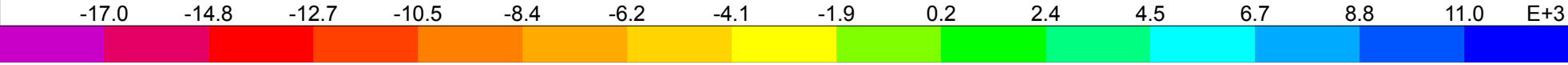
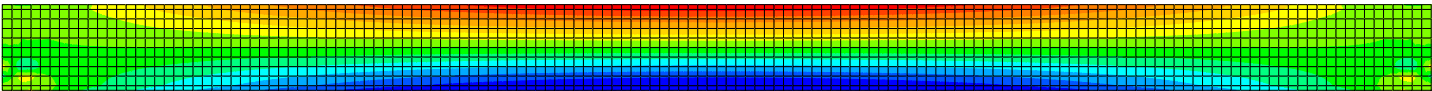


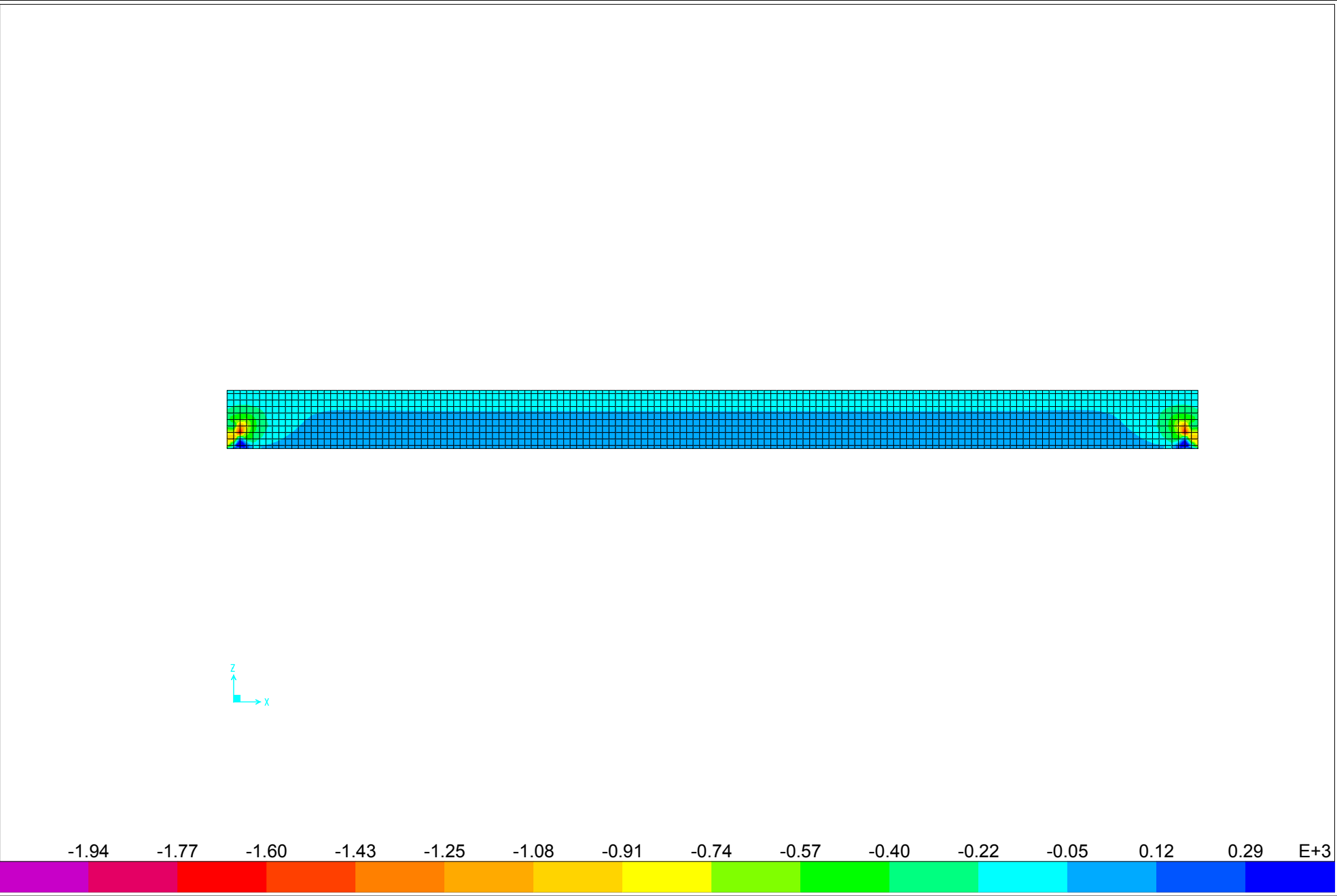


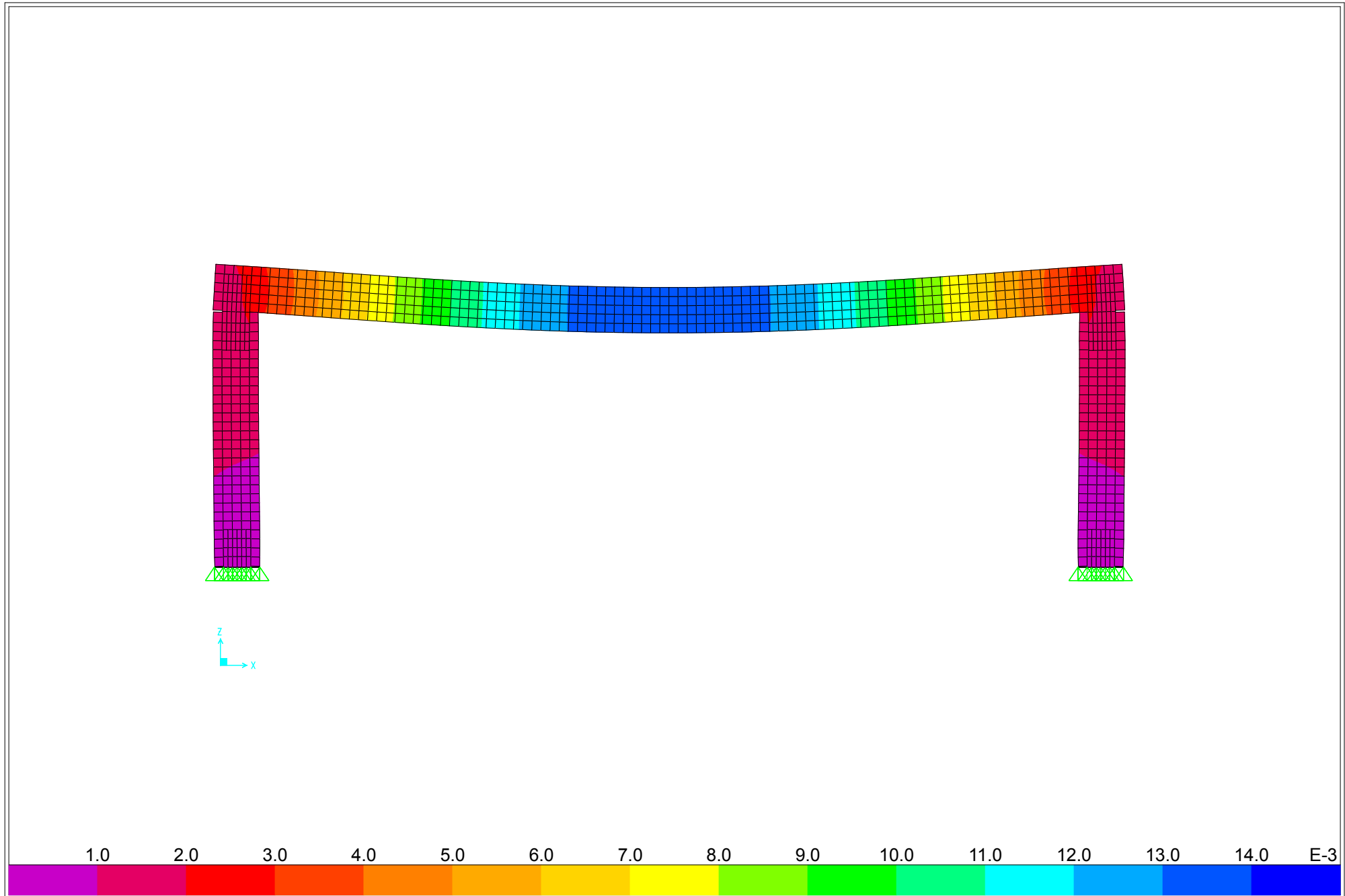


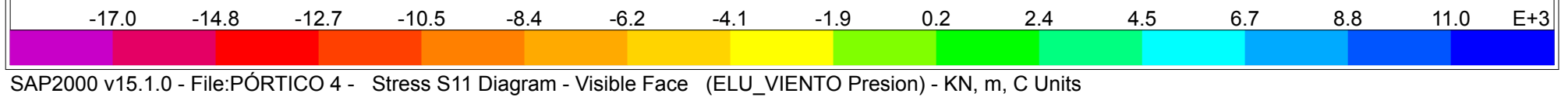
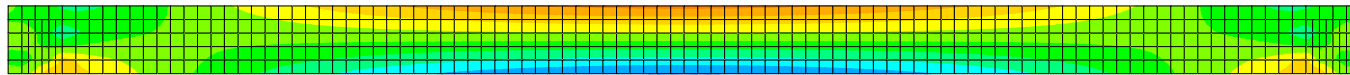




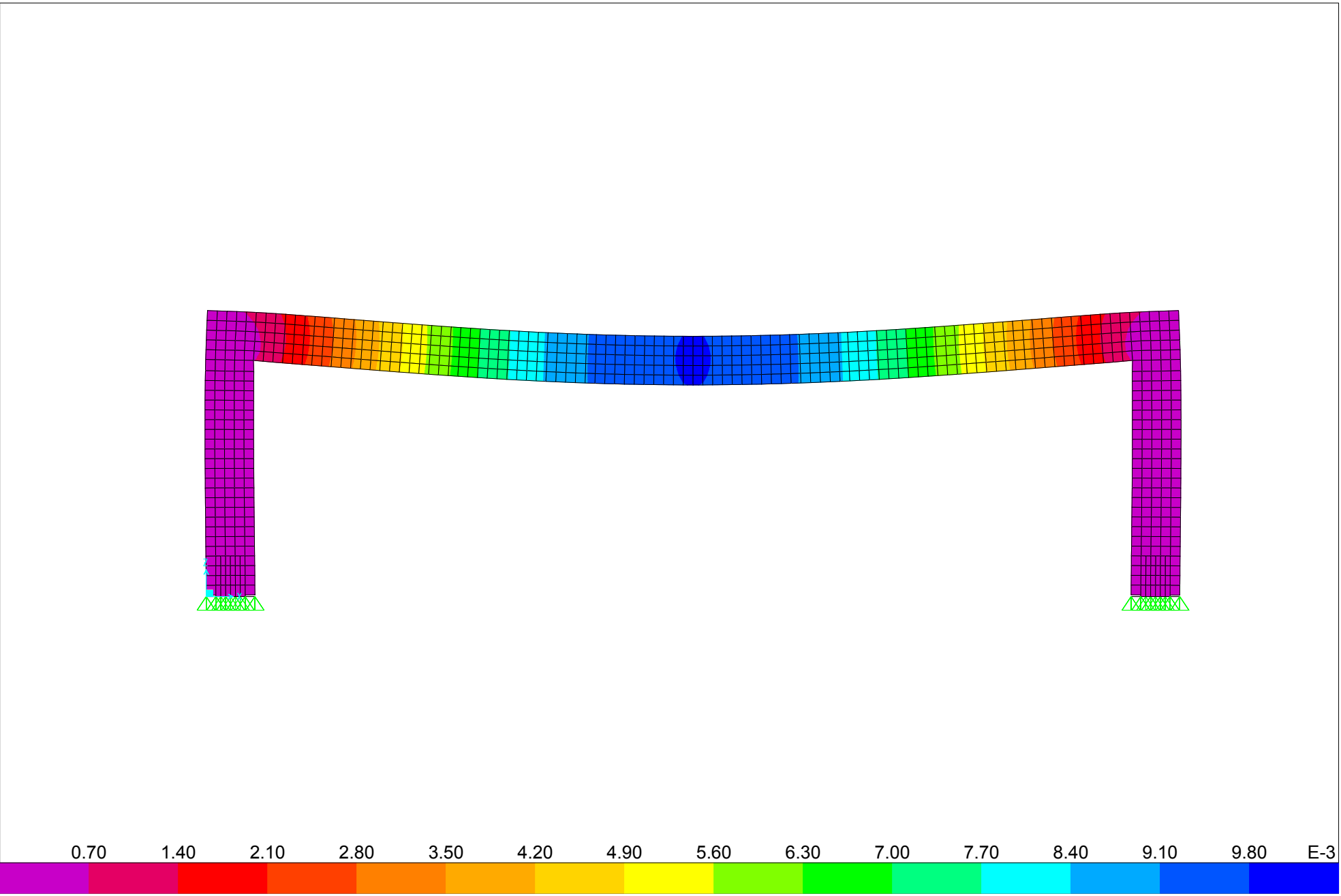




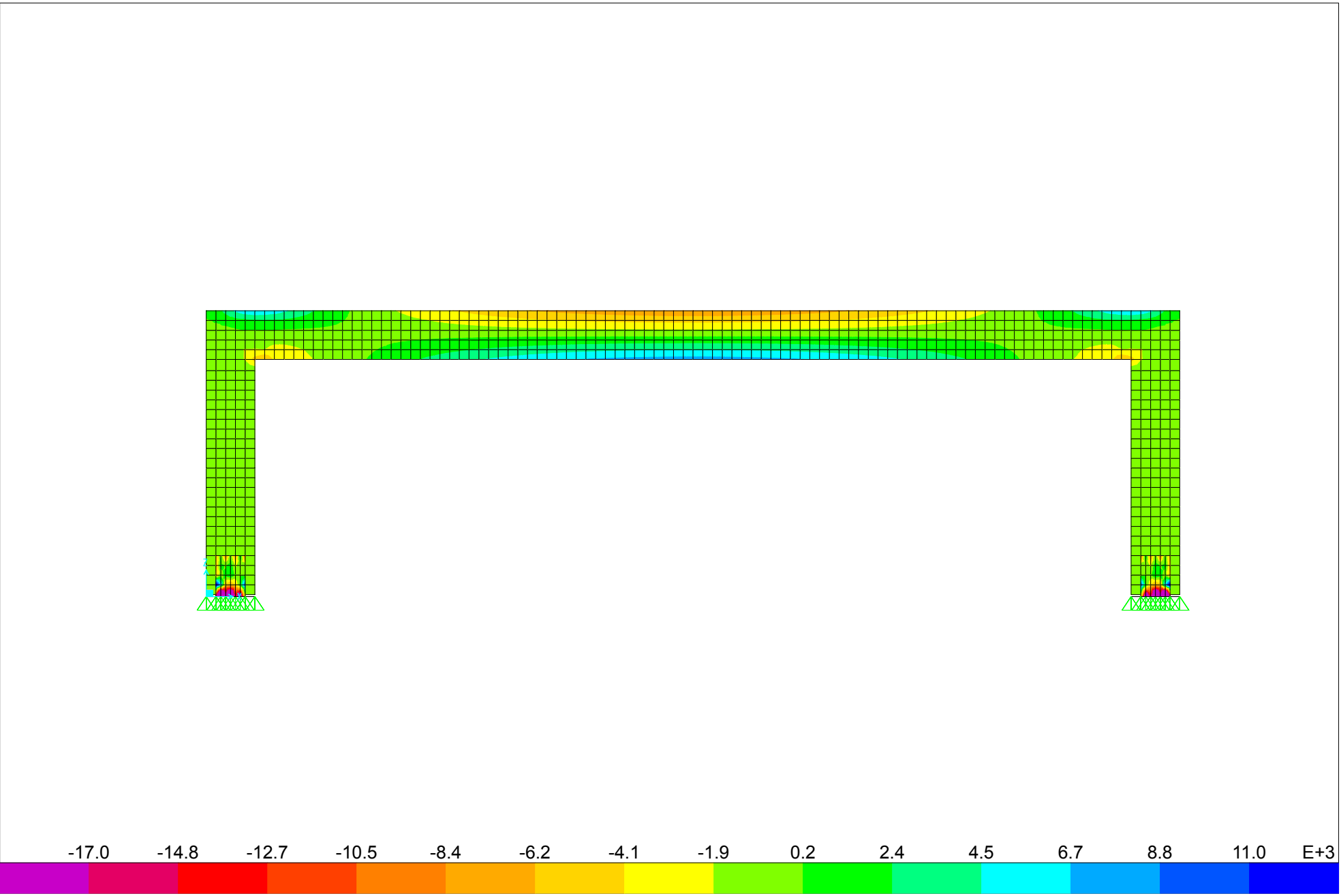


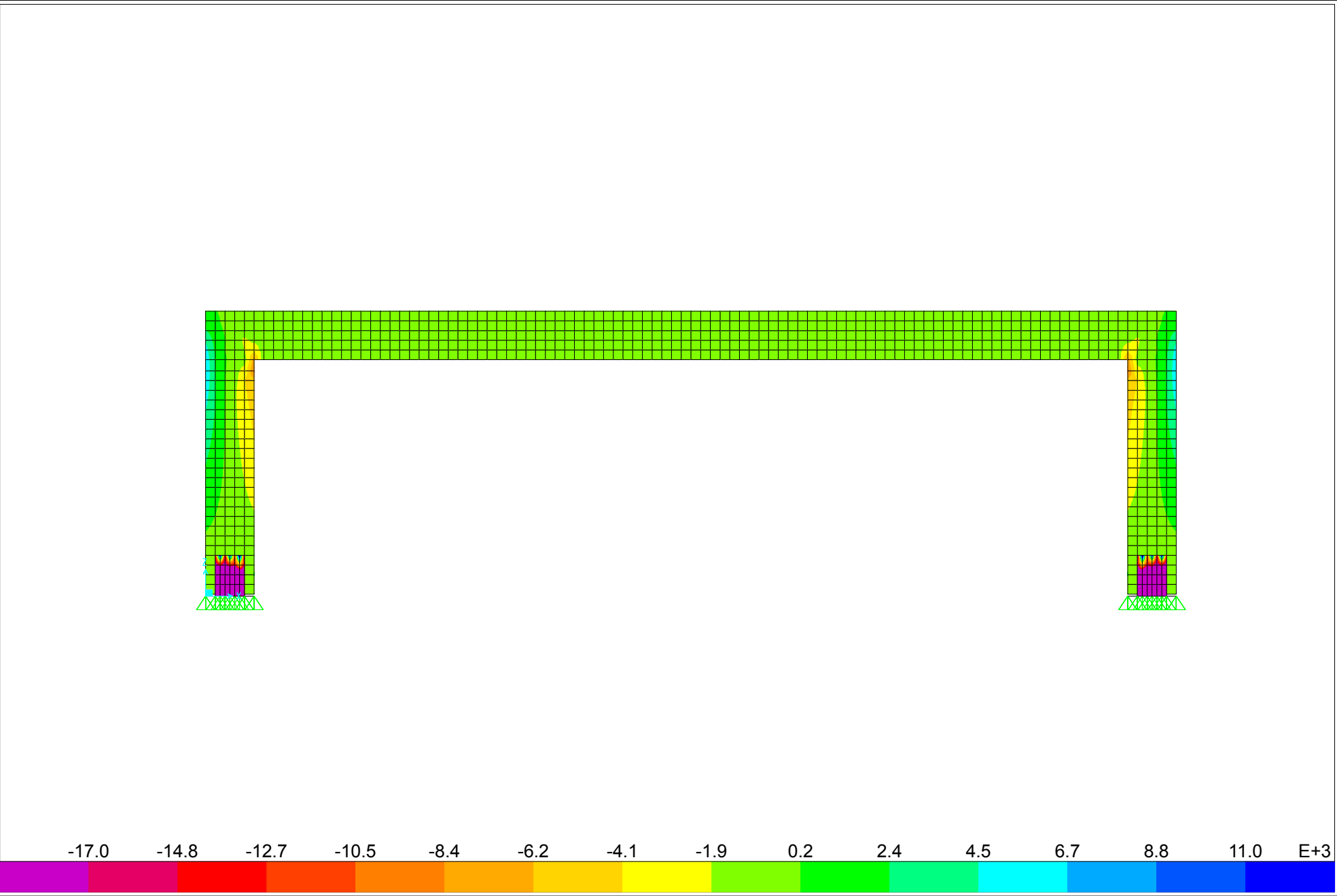


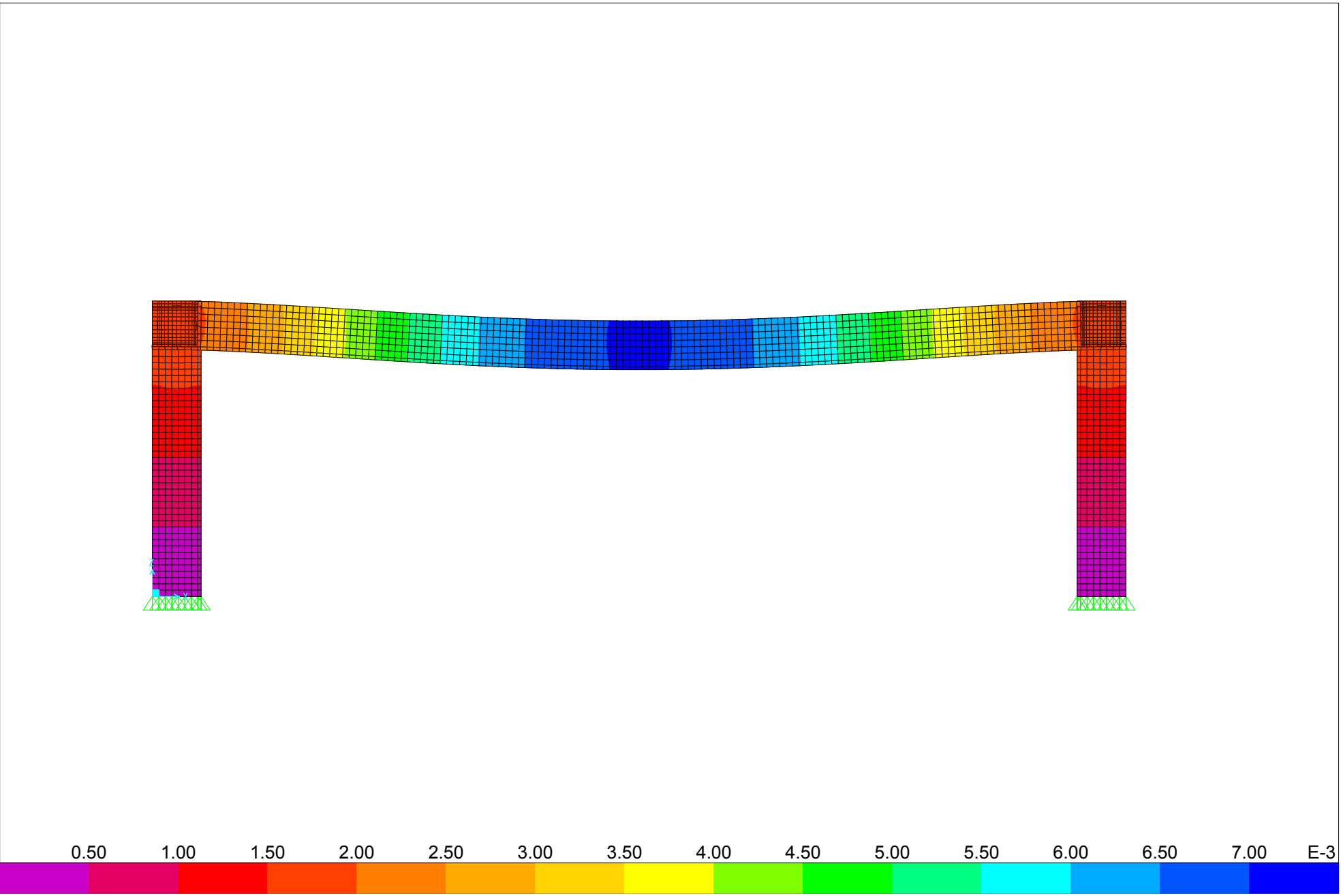


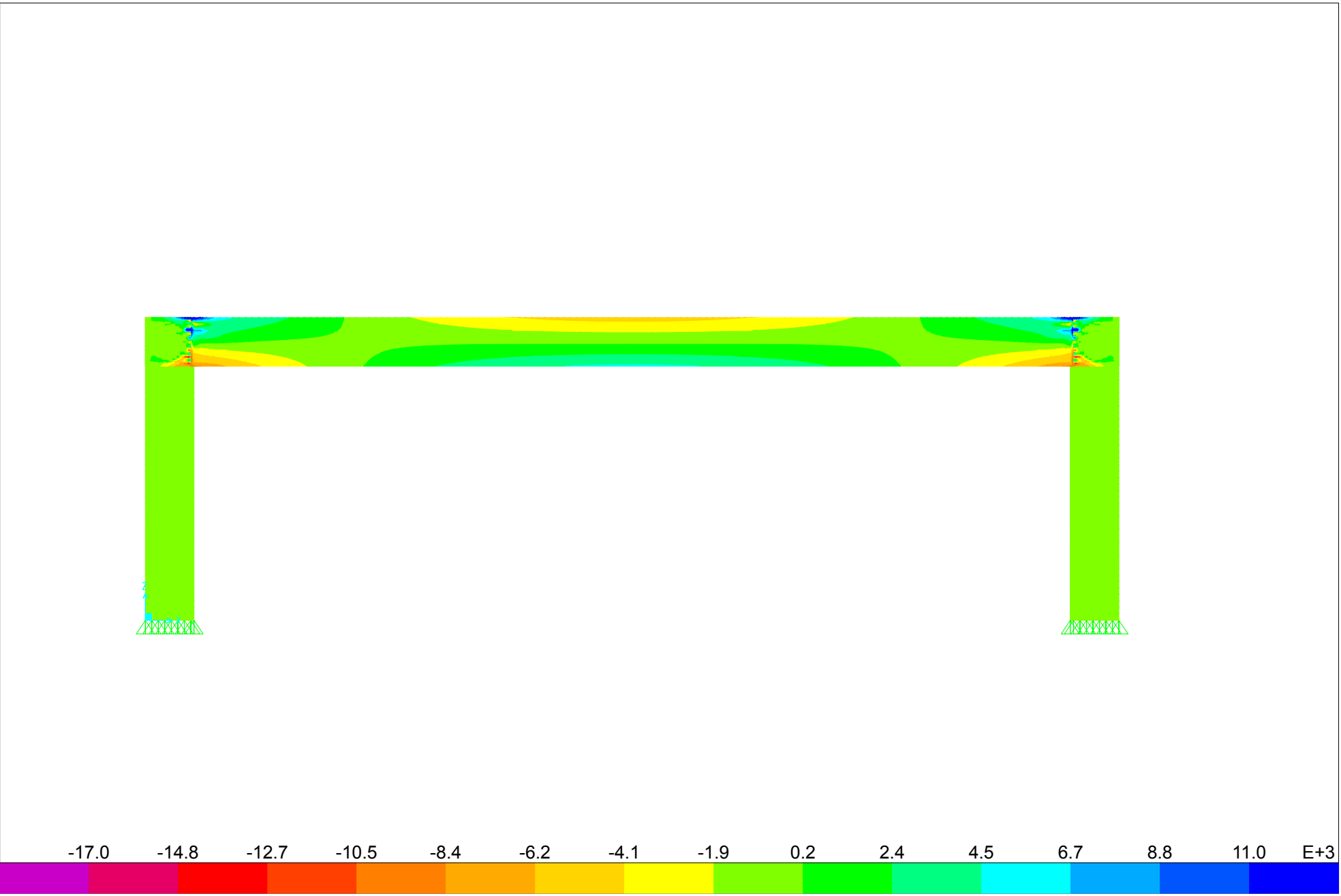




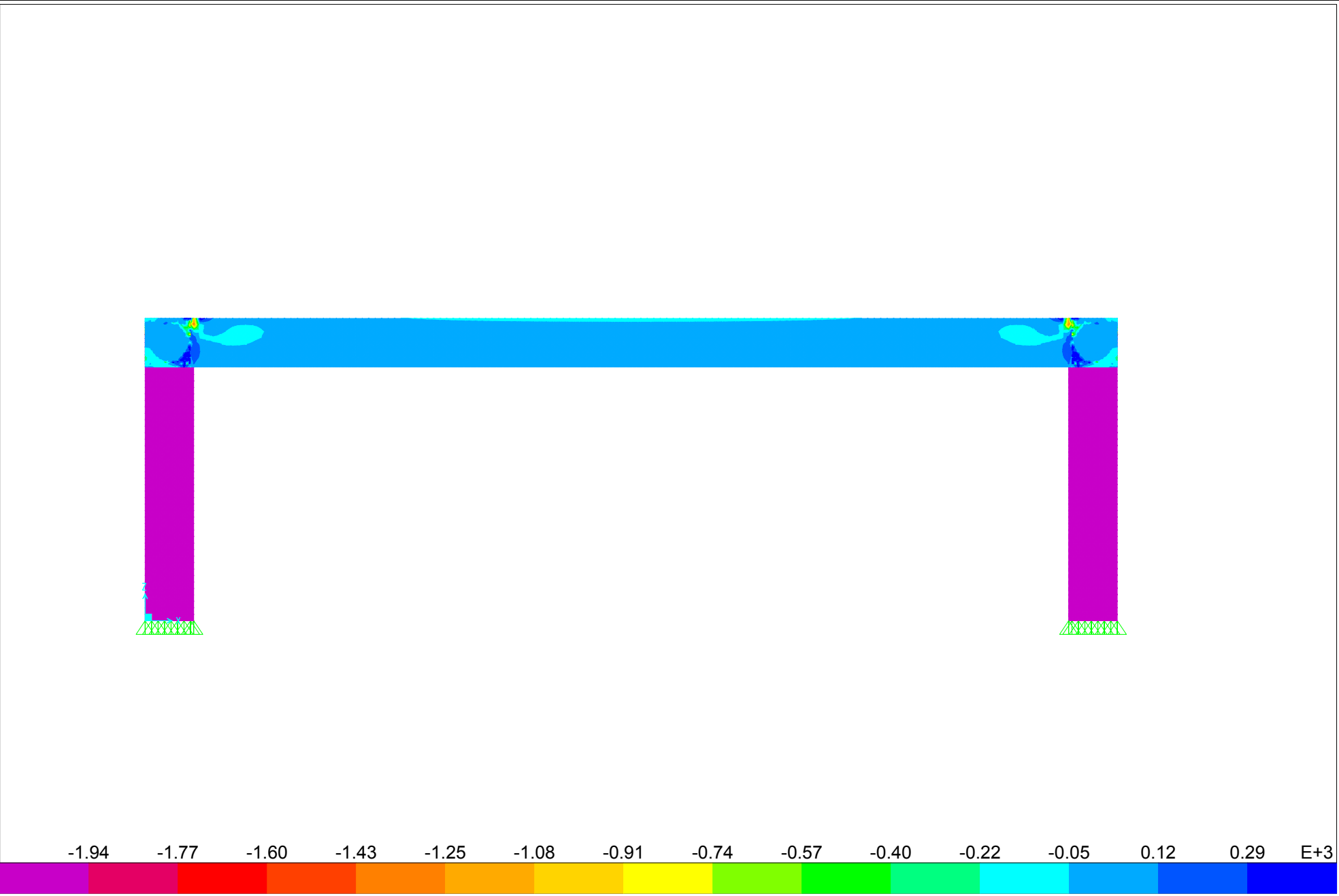


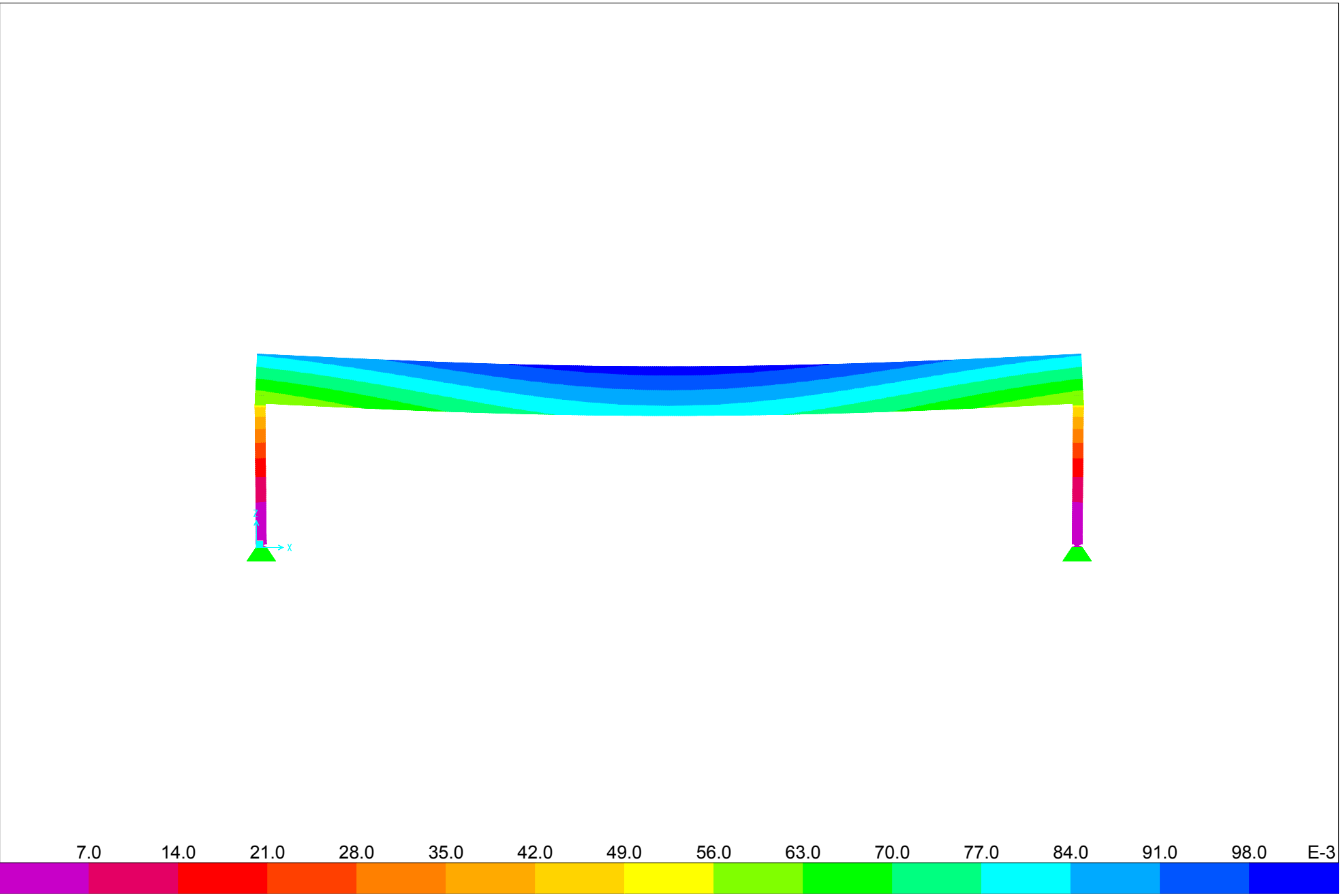


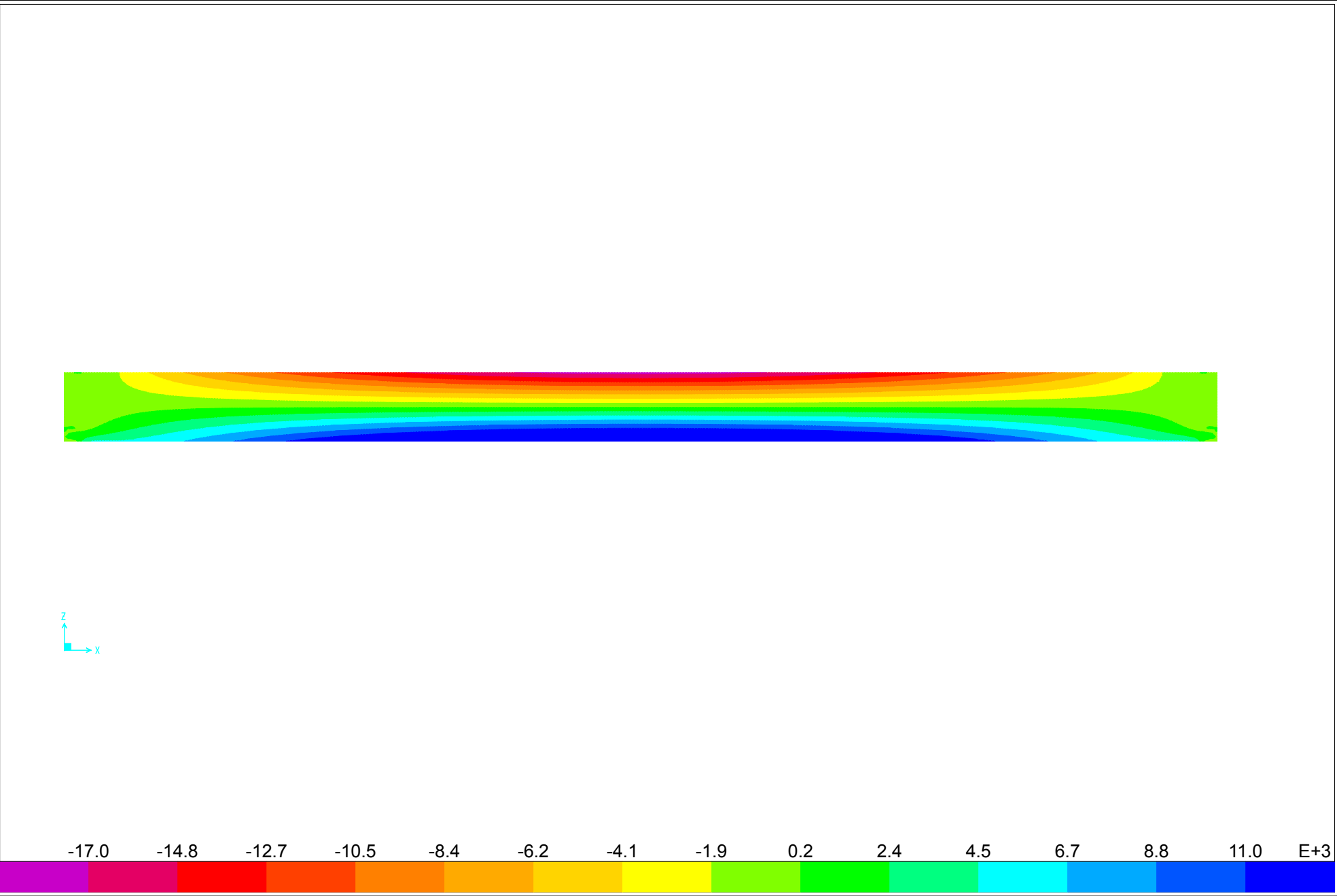




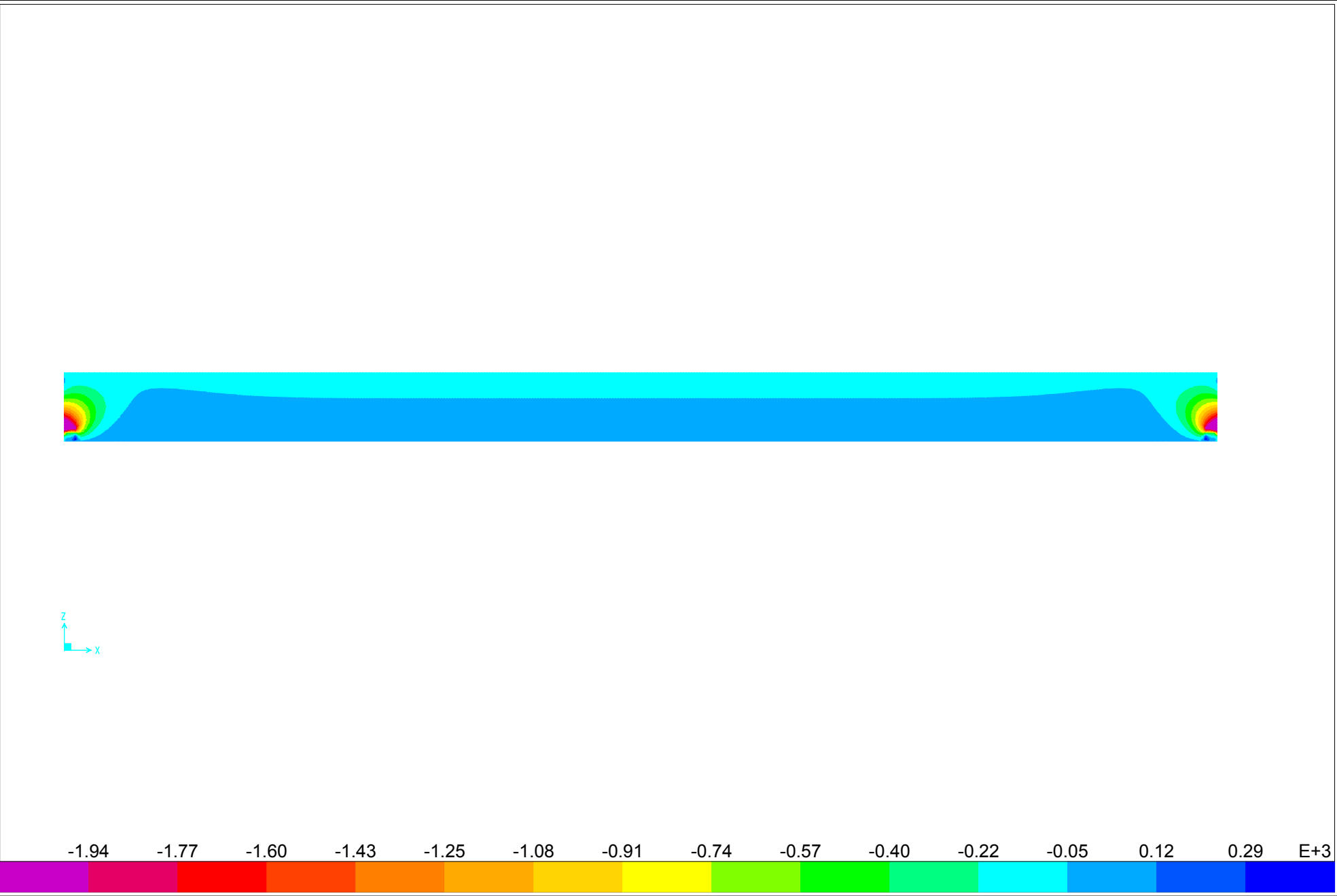
SAP2000 v15.1.0 - File:PÓRTICO 6 - Stress S11 Diagram - Visible Face (ELU\_VIENTO Presion) - KN, m, C Units

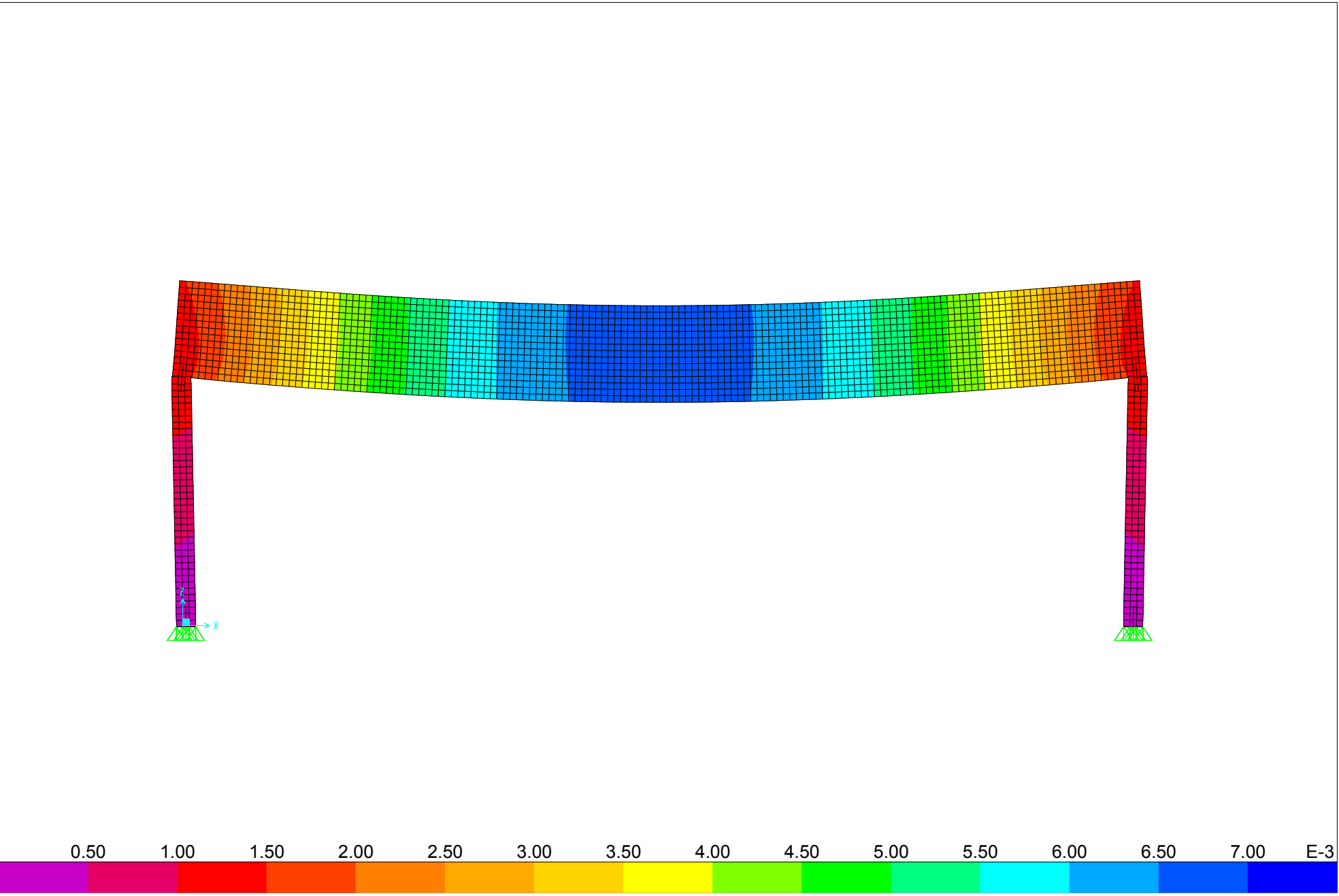


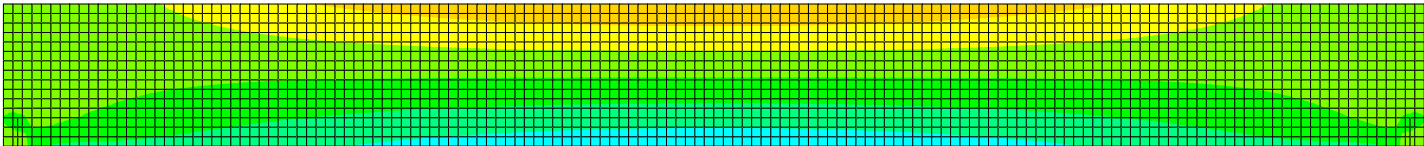


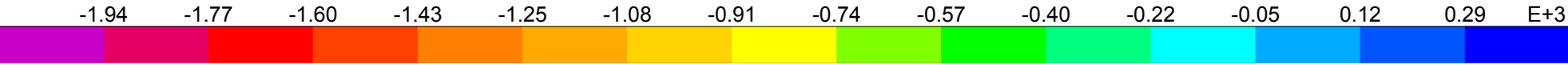
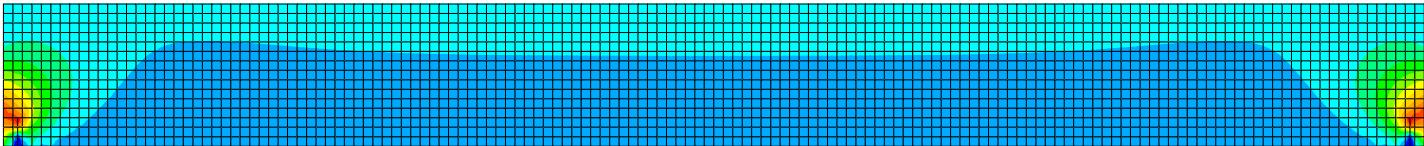


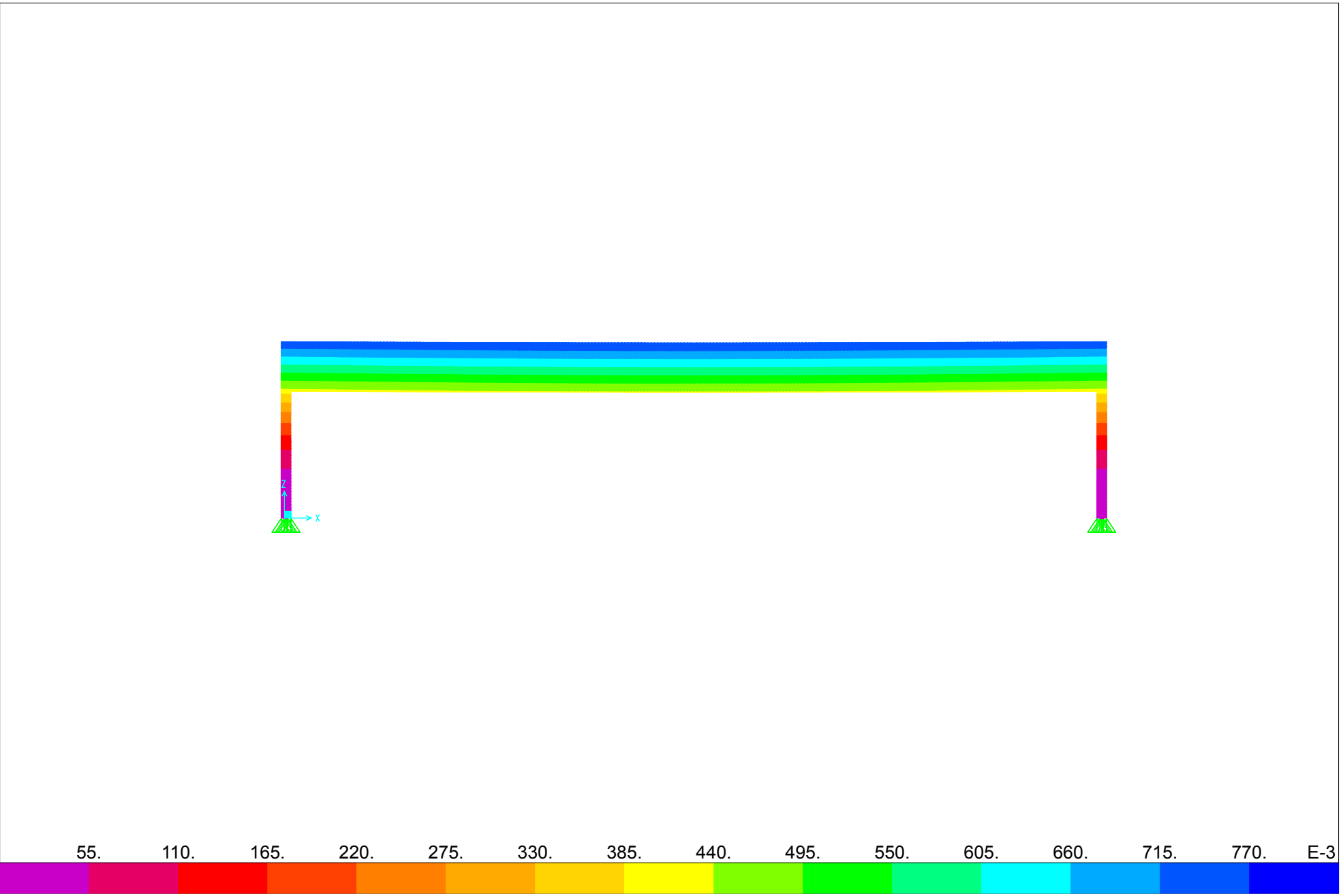


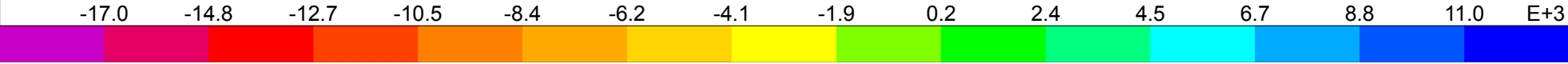
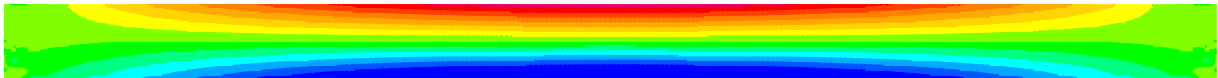


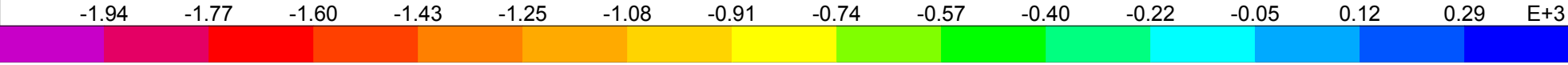


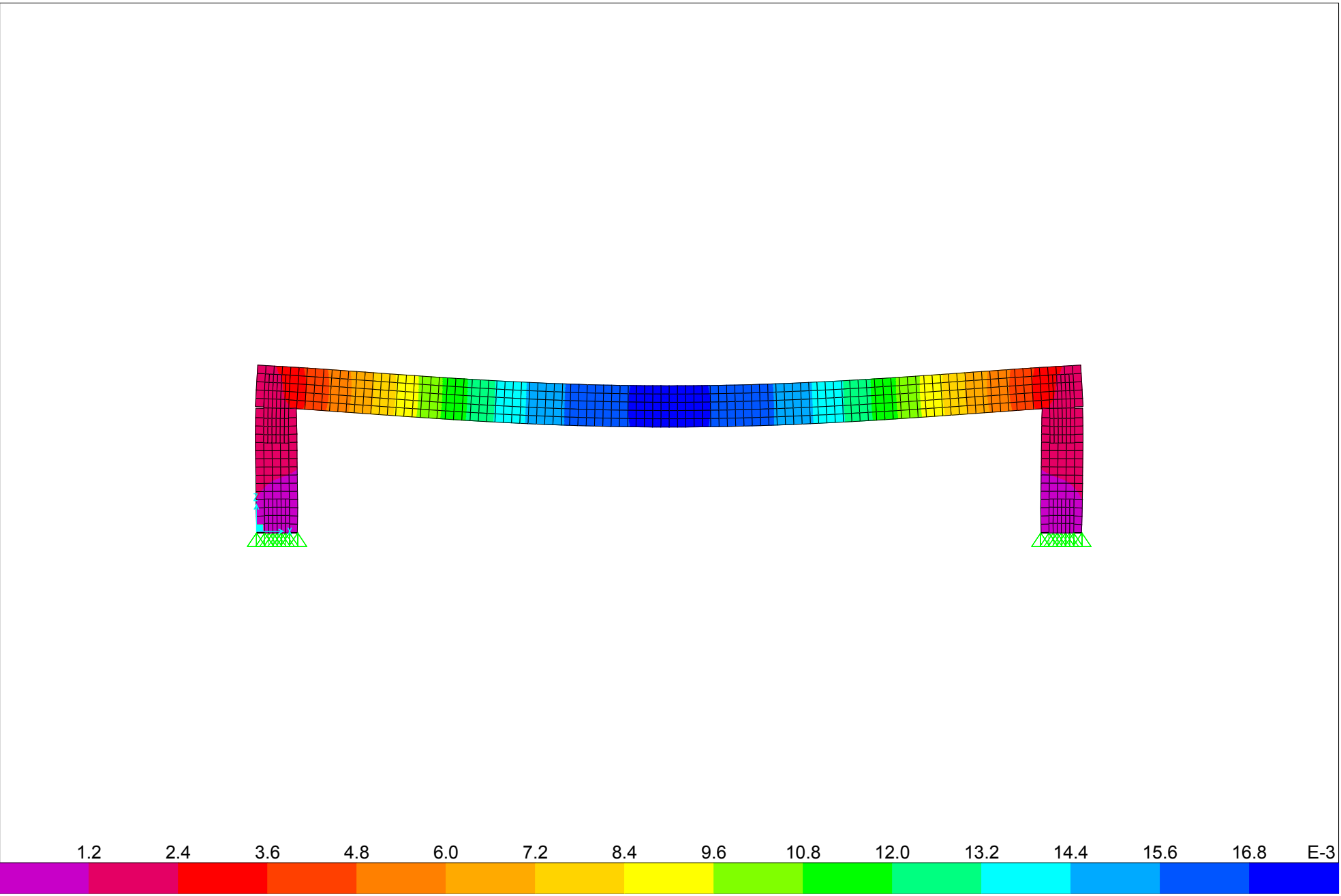






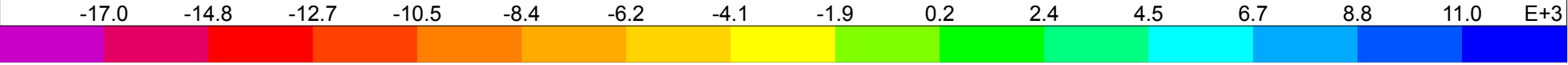
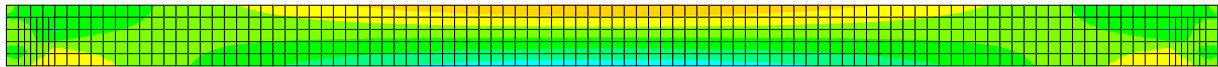


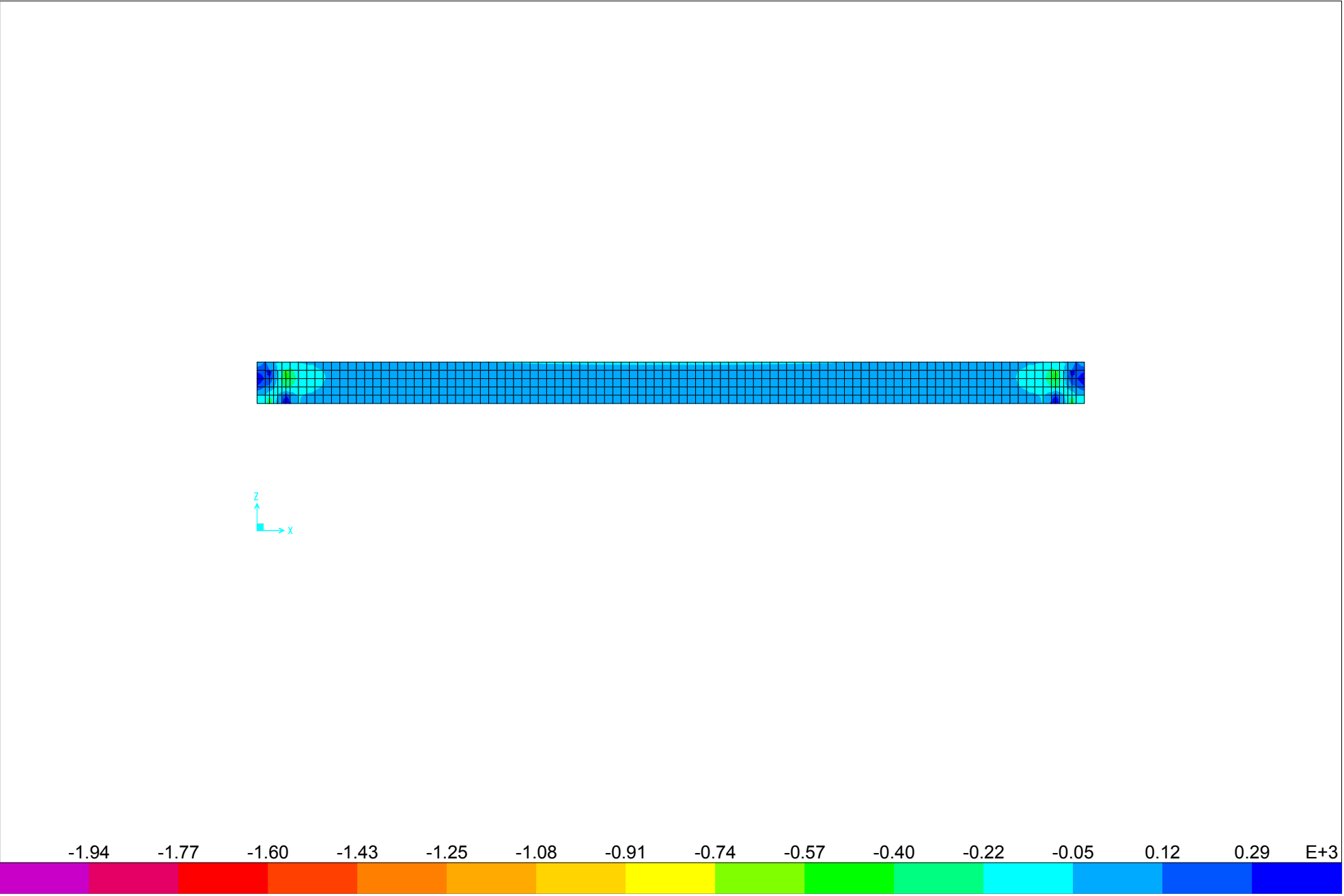


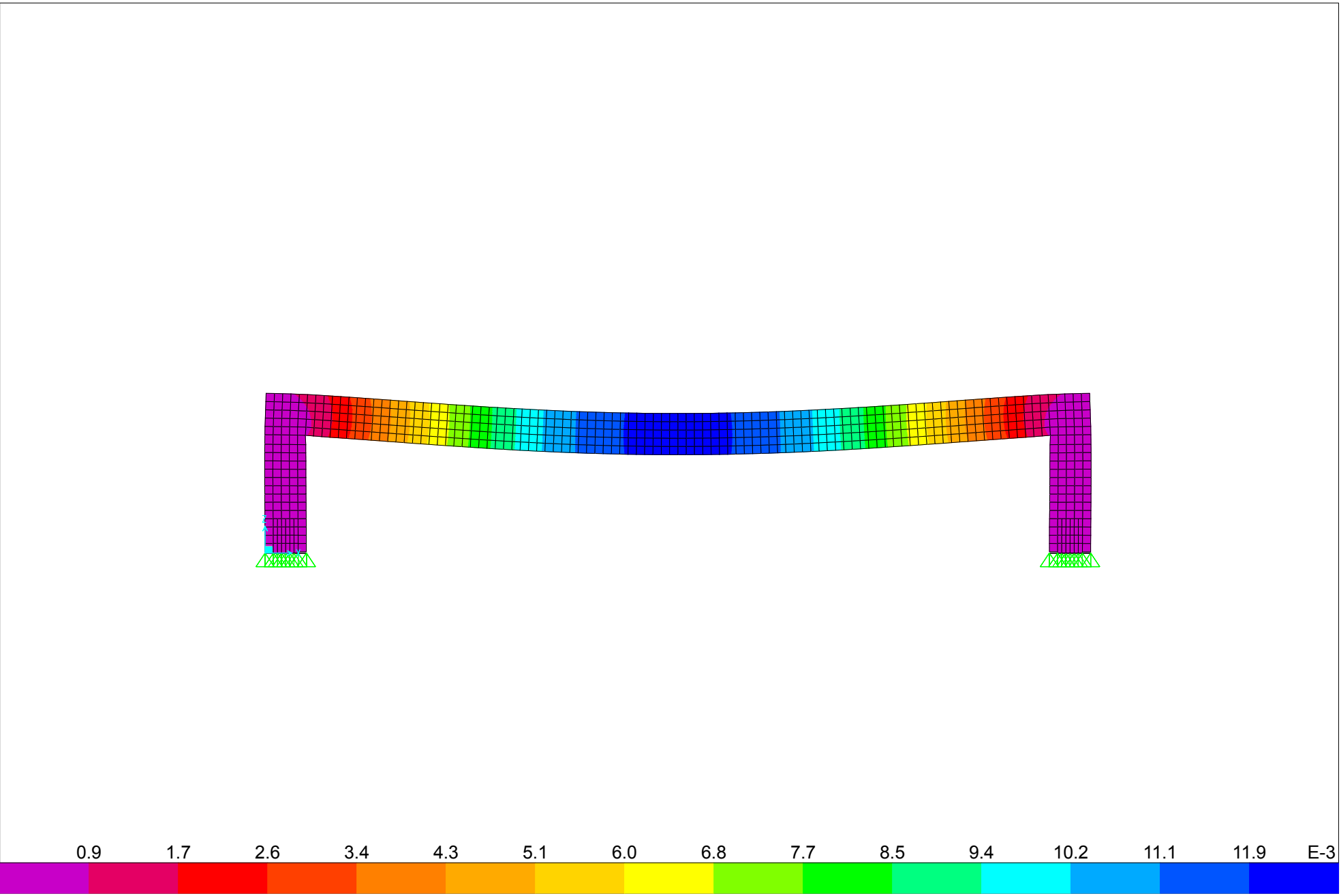


SAP2000 v15.1.0 - File:PÓRTICO 4 - Deformed Shape (ELS\_PERMANENTES) - KN, m, C Units

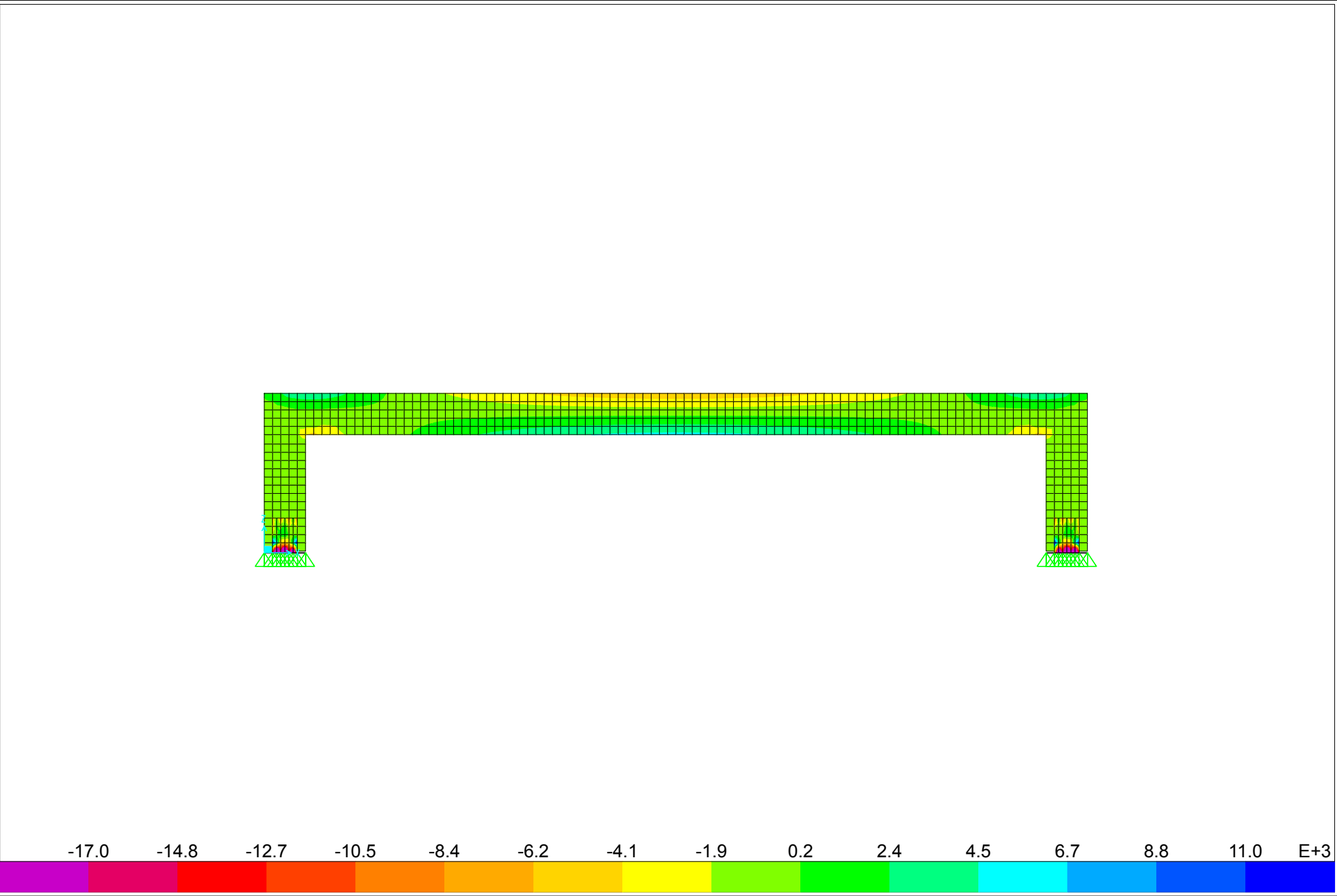


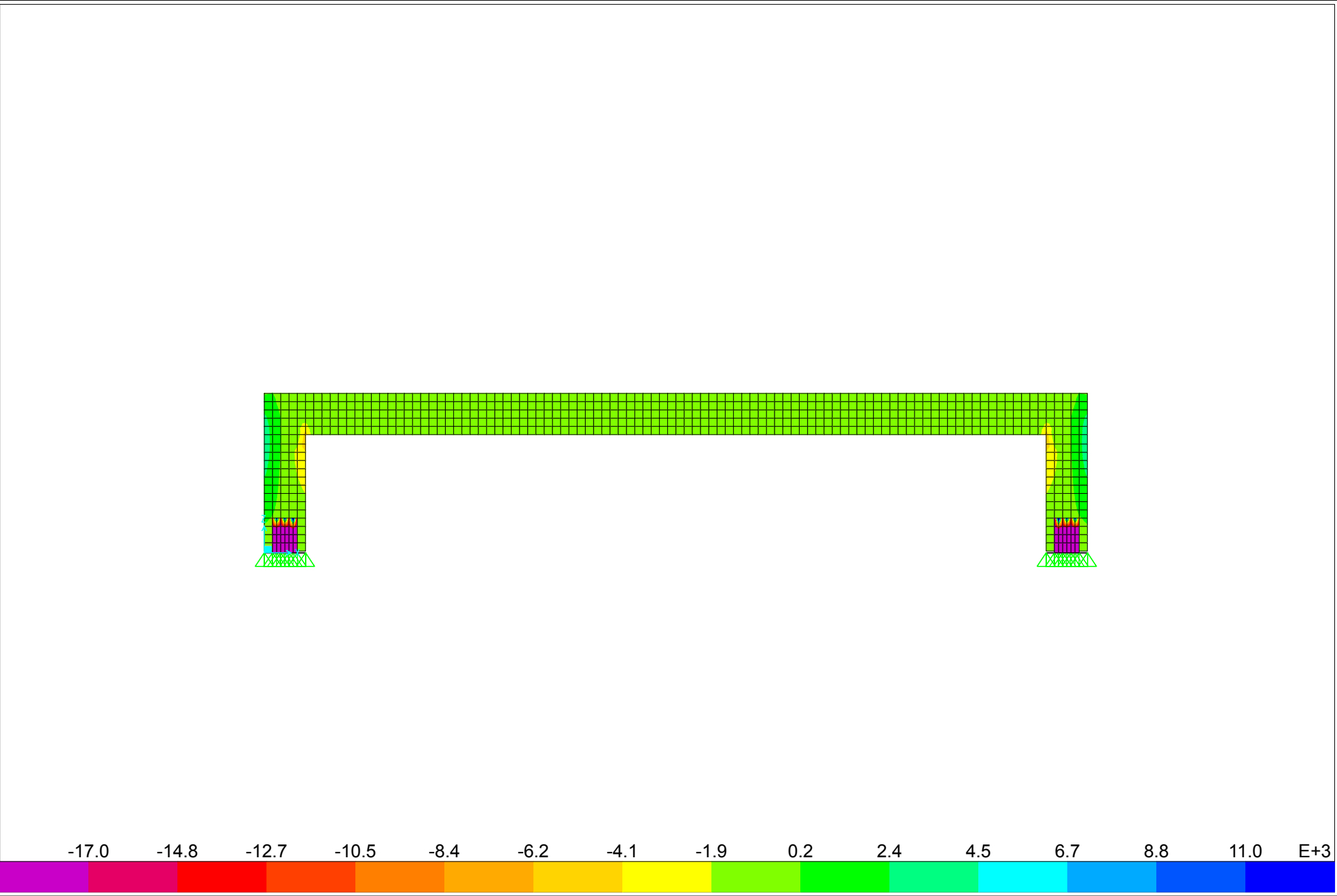




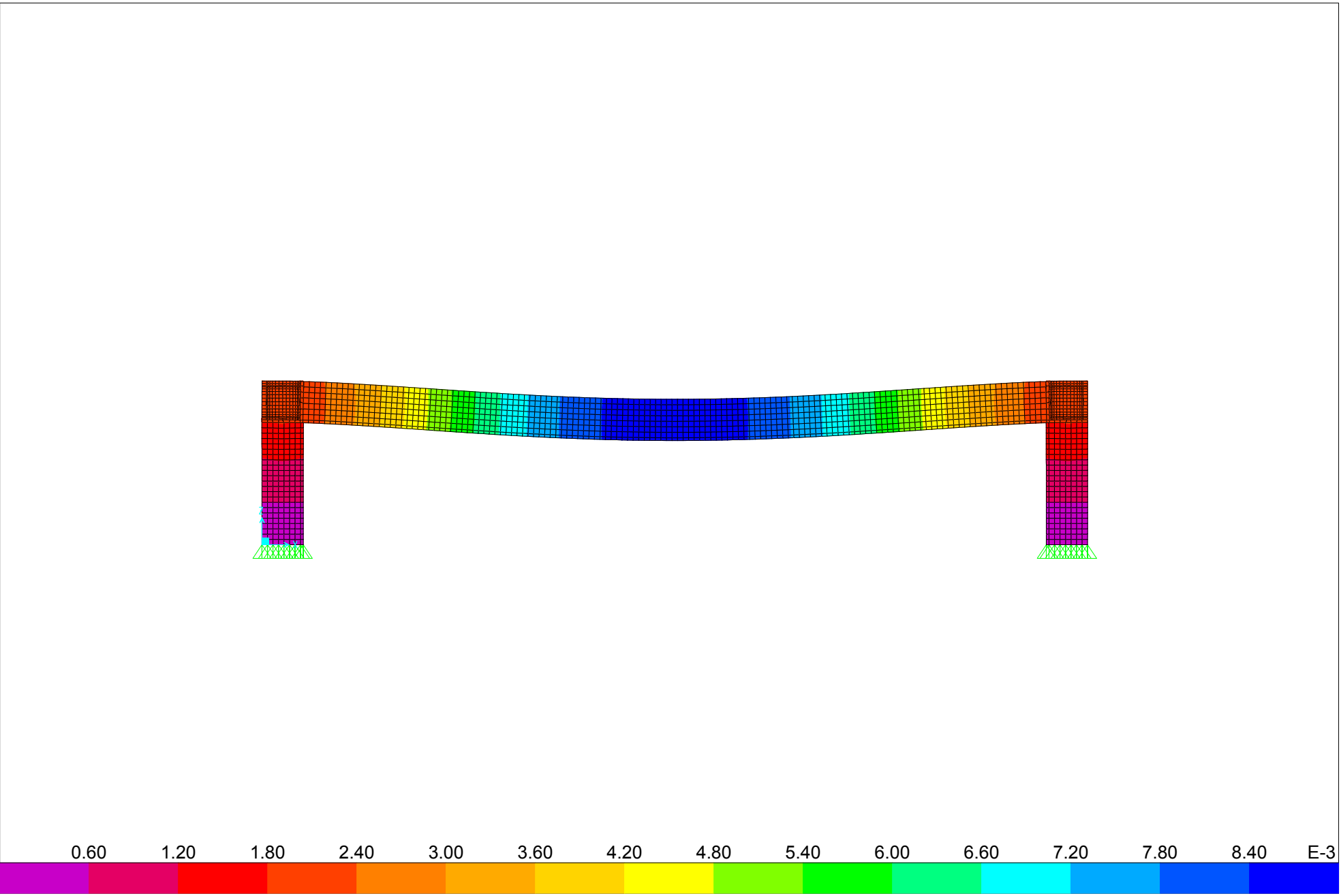


SAP2000 v15.1.0 - File:PÓRTICO 5 - Deformed Shape (ELS\_PERMANENTES) - KN, m, C Units





SAP2000 v15.1.0 - File:PÓRTICO 5 - Stress S22 Diagram - Visible Face (ELU\_VIENTO Presion) - KN, m, C Units



SAP2000 v15.1.0 - File:PÓRTICO 6 - Deformed Shape (ELS\_PERMANENTES) - KN, m, C Units

